

Naissance et renaissance
d'une cathédrale

NOTRE-DAME DE PARIS SOUS L'ŒIL DES SCIENTIFIQUES

Résumés
et posters

cnrs

Colloque interdisciplinaire

22 – 24 avril 2024

Cité de l'Architecture et du Patrimoine, Paris

En partenariat avec



22 – 24 avril 2024

Cité de l'Architecture et du Patrimoine, Paris

Naissance et renaissance d'une cathédrale **Notre-Dame de Paris** **sous l'œil des scientifiques**

SOMMAIRE DES RÉSUMÉS DES SESSIONS

Page 3 • SESSION 1 : Un chantier hors-normes, interdisciplinaire et
interinstitutionnel

Page 8 • SESSION 2 : Une chronologie revisitée
(Alexa Dufraisse et Yves Gallet)

Page 12 • SESSION 3 : Matériaux et structures à l'épreuve du feu
(Claudine Loisel)

Page 16 • SESSION 4 : Savoir-faire et techniques de chantier :
faire revivre l'histoire
(Yves Gallet et Véronique Dassié)

Page 19 • SESSION 5 : L'approvisionnement du chantier, d'hier à aujourd'hui :
une nouvelle lecture interdisciplinaire (Maxime L'Héritier)

Page 24 • SESSION 6 : Structures et expériences architecturales
(Stéphane Morel et Arnaud Ybert)

Page 28 • SESSION 7 : Notre-Dame au prisme du numérique
(Livio De Luca et Mylène Pardoën)

Page 32 • SESSION 8 : La cathédrale dans son environnement
(Alexa Dufraisse et Jean-Luc Dupouey)

Page 35 • SESSION 9 : Notre-Dame : un lieu vécu
(Dany Sandron et Sylvie Sagnes)

POSTERS Page 36 à 70

Un chantier scientifique interdisciplinaire

Auteur.es de la présentation :

DILLMANN PH.¹, LIÉVAUX P.², MAGNIEN A.², REGERT M.¹

Affiliation
des auteur.es

1 - CNRS

2 - Ministère de la Culture

03

RÉSUMÉ :

Au lendemain de l'incendie qui a frappé la cathédrale Notre-Dame de Paris le 15 avril 2019, de nombreux scientifiques se sont mobilisés pour agir afin de collecter, sauvegarder et mettre à profit l'information scientifique contenue dans l'architecture et dans les vestiges du monument blessé. Les recherches mises en œuvre portent sur la matérialité du monument mais aussi sur certains aspects immatériels, qu'il s'agisse des émotions patrimoniales, des questions d'acoustique et de paysages sonores ou de la construction d'un double numérique augmenté de la cathédrale.

Ce colloque va permettre de retracer cette aventure scientifique et humaine exceptionnelle, qui rassemble plus de 150 scientifiques issus de domaines variés et complémentaires (histoire, histoire de l'art, acoustique, science des matériaux, anthropologie, etc.).

Ce sera l'occasion de détailler les enjeux de la recherche actuelle sur Notre-Dame de Paris, et, plus largement, sur le patrimoine monumental, de souligner l'importance des vestiges qui ont été collectés, inventoriés, stockés et étudiés après l'incendie, d'évoquer les contraintes propres à ce type de recherche et surtout de présenter les résultats obtenus au cours des cinq dernières années grâce au financement et au soutien sans faille du CNRS et du ministère de la Culture, et à la collaboration fructueuse avec l'Établissement public chargé de la conservation et de la restauration du monument.

A travers neuf sessions, qui transcendent largement les groupes de travail au sein desquels les recherches se sont organisées (Bois, Métal, Pierre, Verre, Décors monumentaux, Structure, Acoustique, Emotions/Mobilisations, Numérique), nous montrerons comment les découvertes réalisées à l'issue de l'incendie ont permis d'éclairer des pans mal connus ou inconnus de l'histoire de ce monument emblématique, contribuant, en interaction avec le processus de restauration, à la résilience de chacune et chacun d'entre nous face à un accident vécu comme une catastrophe sur l'ensemble de la planète.

QUELQUES RÉFÉRENCES

Dillmann P., Regert M., Magnien A., Liévaux P., De Luca L. (guest editors), 2024, Notre-Dame de Paris: a multidisciplinary scientific site. Special Issue of the *Journal of Cultural Heritage* 65, 240 pages. <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-cultural-heritage/vol/65> / Dillmann P., Liévaux P., Magnien A., Regert M. (dir.), 2022, Notre-Dame de Paris. La Science à l'œuvre. Éditions CNRS — Ministère de la culture — cherche midi, Paris, 184 pages.

De la recherche à la restauration, de la restauration à la recherche, une boucle sans fin.

Auteur.es de la présentation :
DIDIER M-H.¹ TRUILLET J.²

RÉSUMÉ :

Le 15 avril 2019, la cathédrale Notre-Dame de Paris brûlait entraînant la mobilisation de nombreux scientifiques et la création des différents groupes de recherches. Le chantier a permis l'accès à de nombreuses parties de l'édifice jusque-là inaccessibles. A travers plusieurs exemples dont celui des peintures murales réalisées sous la conduite d'Eugène Viollet-le-Duc ou l'analyse des matériaux constituant le monument, nous montrerons le lien entre le chantier et la recherche. La restauration implique des choix qui doivent être aidés par des connaissances scientifiques consolidées. Elle induit aussi de nouveaux questionnements en histoire de l'art qui ne peuvent se résoudre qu'à travers l'aide de la recherche scientifique. Peut-on reconstituer des parties disparues virtuellement ? Peut-on mieux comprendre les techniques employées ? Sont-elles conformes aux écrits que nous connaissons ? Les champs de recherches sont multiples et nous mettrons plusieurs années à analyser toutes les données que nous engrangeons depuis bientôt cinq ans.

**Affiliation
des auteur.es**

1 - Conservatrice
générale du patrimoine,
conservatrice des
monuments historiques
Direction régionale
des affaires culturelles
d'Ile-de-France

2 - Conservateur en chef
du patrimoine, adjoint
science et patrimoine
à la directrice générale
déléguee Etablissement
public chargé de la
conservation et de
la restauration de la
cathédrale Notre-Dame
de Paris

04

Notre-Dame de Paris et ses abords : l'archéologie comme source de renouvellement des connaissances

Auteur.es de la présentation :

CHAOUI-DERIEUX D.², BESNIER C.¹, CIVALLERI, H.¹, COLONNA C.³, HULIN, G.⁴,
GUINCHARD-PANSERI P.¹, PEIXOTO X.¹, POYETON, A.¹, ROBIN B.¹, WARME N.¹

RÉSUMÉ :

Les travaux menés dans le cadre du chantier de sécurisation puis de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris depuis le 15 avril 2019 sont à l'origine de plus d'une dizaine d'opérations d'archéologie préventive, toutes menées par l'Inrap. Réalisées tant à l'intérieur de l'édifice (croisée, narthex et bas-côtés, bras du transept, cave Soufflot) qu'à ses abords immédiats (parvis et flanc sud de la cathédrale), ces interventions ont permis de documenter de manière inédite la cathédrale gothique et son contexte de construction, mais également certains des édifices qui l'ont précédée (« édifice du parvis » attribué à la période carolingienne et cathédrale romane notamment), ainsi que le processus de formation et d'occupation de l'île de la Cité depuis le début de notre ère.

La phase terrain s'achevant tout juste pour un grand nombre de ces opérations, la communication présentée ici livre un état brut des données, en attente de la mise en œuvre d'études spécialisées et d'une interprétation plus poussée des résultats. Leur mise en perspective avec les données des fouilles anciennes (mentions du journal des travaux d'Eugène Viollet-le-Duc, observations faites par la Commission du Vieux Paris lors de la rénovation du chauffage urbain au début des années 1980 notamment), permettra à terme d'offrir un regard totalement renouvelé sur la cathédrale et ses abords.

Affiliation des auteur.es

1 - Inrap Centre
Ile-de-France

2 - DRAC Ile-de-France,
service régional de
l'archéologie, UMR 7041
ArScAn

3 - Inrap Centre - Ile-
de-France, UMR 6273
CRAHAM - UNICAEN -
CNRS

4 - Inrap / Direction
scientifique et technique,
chercheur associé à l'UMR
7619 METIS

05

Données numériques et perspectives pluridisciplinaires : la construction d'une cathédrale des savoirs

Auteur.es de la présentation :
DE LUCA L.¹

Affiliation
des auteur.es

06

1 - CNRS/MAP/Marseille

RÉSUMÉ :

La recherche sur le patrimoine transforme l'interaction entre objets matériels et études multidisciplinaires en un vecteur de production de savoirs collectifs. Notre démarche innovante en matière de modélisation computationnelle et de numérisation tire parti du chantier scientifique de Notre-Dame de Paris, mobilisant des spécialistes de divers domaines (archéologie, anthropologie, architecture, histoire, chimie, physique, informatique) pour élaborer un corpus de données reflétant les pratiques scientifiques actuelles dans l'étude du patrimoine à l'ère numérique. Nous aspirons à transcender la simple numérisation de l'objet physique pour embrasser la connaissance approfondie de celui-ci, examinant comment les caractéristiques de l'objet matériel et les savoirs qui y sont associés se nourrissent mutuellement à travers le prisme de la recherche.

Scientifiquement, notre ambition est d'introduire des approches de corrélation de données multidimensionnelles pour synthétiser, structurer et interpréter un vaste éventail de ressources scientifiques, en se focalisant sur quatre axes fondamentaux : l'espace, la forme, le temps et le domaine de connaissance. Ces axes sont explorés via la représentation géométrico-visuelle, l'annotation et la classification de formes, le suivi temporel, et l'étude des intersections thématiques et disciplinaires.

Méthodologiquement, nous nous attachons à documenter et déchiffrer les démarches scientifiques multidisciplinaires, en éclairant comment divers acteurs produisent, utilisent et interconnectent les données numériques en rapport avec leurs sujets d'étude. L'enjeu est de révéler la nature de la connaissance émergente, ses spécificités disciplinaires et ses liens avec les attributs des objets analysés.

Technologiquement, nous œuvrons à la création d'un écosystème numérique innovant. Ce dispositif socio-technique intègre une suite d'outils collaboratifs pour l'acquisition, la catégorisation et l'annotation des ressources, favorisant la conception d'un moteur de corrélation autonome qui facilite l'intégration et l'interrelation dynamique des données et des multiples perspectives scientifiques.

L'approche anthropologique : Notre-Dame de Paris, une aventure humaine

Auteurs de la présentation :

ISNART C. ¹, SAGNES S. ², VOISENAT C. ³.

Affiliation des auteur.es

07

RÉSUMÉ :

Si la présence dans le chantier scientifique de spécialistes de la pierre, du bois, du verre, du métal et des œuvres (vitraux, sculptures, ferronneries...) qui en sont issues, paraît une évidence, celle des anthropologues peut sembler plus intrigante. S'en étonner serait oublier qu'un monument n'est pas constitué que de matériaux : Notre-Dame est le produit complexe d'une multitude d'éléments où s'entremêlent événements historiques, discours savants, œuvres littéraires ou artistiques, dispositions juridiques ... ; tous pris dans les flux qui constituent notre modernité qu'il s'agisse de la circulation des personnes ou de celle des images véhiculées par la communication de masse ; tandis que, comme tout patrimoine qui se veut tout à la fois bien commun universel et emblématique de l'histoire d'un groupe humain, elle est disponible pour de multiples formes d'appropriations, collectives ou individuelles.

Démêler cet écheveau de représentations et les enjeux qui les sous-tendent, comprendre la façon dont ils sont toujours actifs dans les sociétés du XXI^e siècle relève des compétences des sciences sociales et en particulier de l'anthropologie qui tente de concilier depuis son origine l'approche universaliste affirmant l'identité de tous les êtres humains, recherchant leurs ressemblances, et l'approche culturaliste où prédomine le souci de l'étude de chaque groupe humain dans le respect et l'analyse de ses différences culturelles.

Au-delà de ces questions théoriques qui en font une discipline particulièrement sensible aux échelles de déploiement des imaginaires patrimoniaux, l'anthropologie est aussi une pratique du terrain, une science de la scrutation, bref, une ethnographie, une écriture du réel, non pas dans sa globalité mais à partir de postes d'observation soigneusement identifiés par le chercheur.

Embarqués dans le chantier scientifique pour comprendre les ressorts de l'extraordinaire émotion patrimoniale suscitée par l'incendie d'avril 2019, les anthropologues ont ouvert plusieurs pistes de recherche : la première a consisté à écouter et analyser les témoignages de l'attachement des publics de la cathédrale. La seconde a permis de montrer que l'exceptionnalité de Notre-Dame résulte d'une hybridation des matérialités et des sacralités complexes qui la composent. La troisième piste, comme il est d'usage en anthropologie, mettait ces réflexions et ces résultats en perspective, par la comparaison avec d'autres catastrophes patrimoniales dans le monde.

Enfin, effet secondaire de la démarche ethnographique, les anthropologues ont aussi constitué presque sans le vouloir une archive du chantier scientifique dans ses petits et grands moments ; un kaléidoscope des émotions qui traversaient toutes celles et ceux qui œuvraient à cette entreprise hors-norme ; un témoignage de la façon dont se construit, à la fois collectivement et individuellement, la mémoire d'une aventure humaine d'exception, du selfie pour ses enfants à la médiation grand public.

1 - UMR 7307,
IDEAS/CNRS/Aix-en-
Provence

2 - UMR 9022,
Héritages/CNRS/Cergy-
Pontoise.

3 - UMR 9022,
Héritages/Ministère de la
Culture/Cergy-Pontoise.

Dater le chevet de Notre-Dame de Paris : regards croisés

Auteur.es de la présentation :

GALLET Y.¹, HUNOT J.-Y.², BERNARD M.³, BROSSIER B.⁴, DUFRAISSE A.⁵, GIRARDCLOS O.⁶, LEMOINE M.⁵, PENAGOS C.⁶, MECHLING J.-M.⁷, PHALIP B.⁸, YBERT A.⁹, L'HÉRITIER M.¹⁰, BECK L.¹¹, DELQUÉ-KOLIC E.¹¹, AZÉMA A.¹², DILLMANN PH.³.

RÉSUMÉ :

Le chevet de Notre-Dame de Paris pose une série de problèmes qui ont été insuffisamment étudiés. C'est le cas, en particulier, des problèmes de chronologie, alors même que le chevet a été la première partie de la nouvelle cathédrale gothique à avoir été mise en chantier. À quelle époque les travaux ont-ils débuté ? Comment et à quelle vitesse ont-ils été conduits, à quelle date ont-ils été terminés et comment cette première phase du chantier s'articule-t-elle aux campagnes de construction qui ont suivi ? Le début des travaux autour de 1160 passe pour être circonscrit avec précision par les textes, l'initiative étant attribuée à l'évêque Maurice de Sully (1160-1196), tandis que la première pierre est réputée avoir été posée par le pape Alexandre III en 1163. Pour la fin des travaux, les historiens invoquent, d'une part, le témoignage de Robert de Torigni, abbé du Mont Saint-Michel, qui, de passage à Paris en 1177, déclare avoir vu le chevet quasiment terminé, « à l'exception du grand toit » ; et, d'autre part, la consécration du maître-autel en 1182. Cependant, une cérémonie telle qu'une consécration a très bien pu être célébrée dans un édifice inachevé ; le témoignage de Robert de Torigni est difficile à interpréter ; quant à la source qui signale la pose de la première pierre à l'année 1163, elle ne date elle-même que du XIV^e siècle, et s'avère ainsi bien postérieure aux faits qu'elle relate.

Il était donc fondamental de revenir sur ces questions de datation, essentielles dans le cas d'un édifice de l'importance de Notre-Dame pour l'histoire des cathédrales gothiques. L'incendie du 15 avril 2019 a permis à trois groupes de travail (Pierre, Bois, Métal) de lancer ensemble des enquêtes ciblées sur deux périodes clés du chantier : celle du début des travaux, approchée par une analyse des tirants de bois mis en place pour la construction des voûtes basses, dans le déambulatoire ; et celle de la fin du chantier, avec un réexamen de la datation des voûtes hautes et des bois carbonisés de la charpente, récupérés sur les voûtes au lendemain de l'incendie.

Ce sont ces deux points qui seront abordés dans cette communication, sous l'angle des matériaux. En effet, des échantillons de pierre et de mortier, de goujons et d'agrafes, et d'éléments en bois ont pu être prélevés à l'occasion du chantier de restauration. Ils fournissent une documentation inédite qui permet de réfléchir à nouveaux frais sur la chronologie du chevet.

Affiliation des auteur.es

- 1 - Université Bordeaux Montaigne/Ausonius UMR 5607/Bordeaux
- 2 - Département du Maine-et-Loire/CNRS CReAAH UMR 6566/Angers
- 3 - Université Paris-Saclay/LAPA, IRAMAT UMR 7065, NIMBE UMR 3685, CEA, CNRS/Gif-sur-Yvette
- 4 - ISEM/CNRS/Montpellier
- 5 - MNHN/UMR 7209 AASPE CNRS/Paris
- 6 - UMR 6249 Chrono-environnement CNRS/Université de Franche-Comté/Besançon
- 7 - Université de Lorraine/UMR Institut Jean Lamour/Nancy
- 8 - Université Clermont Auvergne/CHEC/Clermont-Ferrand
- 9 - Université de Bretagne Occidentale/CRBC/Brest
- 10 - Université Paris 8/ArScAn UMR 7041/Saint-Denis
- 11 - UVSQ/LMC14, LSCE-IPSL, CEA, CNRS/Gif-sur-Yvette
- 12 - LRMH, CRC UAR3224, MNHN/Champs-sur-Marne

La construction de la nef : nouvelles données chronologiques

Auteur.es de la présentation :

GIRARD CLOS O.¹, L'HÉRITIER M.², YBERT A.³, BROSSIER B.⁴, DUFRAISSE A.⁵, HUNOT J.-Y.⁶, LEMOINE M.⁵, PENAGOS C.¹, BERNARD M.⁷, BECK L.⁸, DELQUÉ-KOLIC E.⁸, AZÉMA A.⁹, DILLMANN P.⁷

RÉSUMÉ :

Longtemps considéré comme la simple poursuite de l'œuvre du chevet, le chantier médiéval de la nef de Notre-Dame de Paris a peu retenu l'attention des chercheurs. Ils considèrent généralement qu'il a débuté vers 1180 et été mené d'est en ouest, pour s'achever vers 1230. Cette chronologie simplifiée se fonde sur quelques maigres jalons textuels et des critères formels. Les investigations matérielles menées *in situ* ou en laboratoire par les GT Pierre, Métal et Bois dans le cadre du Chantier scientifique, permettent d'établir de nouveaux jalons. L'étude des pierres s'est focalisée sur les claveaux provenant de l'arc doubleau de la nef effondré le 15 avril 2019 mais aussi sur l'ensemble des maçonneries des élévations et sur les voûtes. Les indices des techniques de conception et de construction des structures utilisées par les bâtisseurs médiévaux : signes lapidaires, traces d'outils, épures, trous de boulins, traces de cintrage, métrologie des blocs, agencement et composition des maçonneries, ont été quasi systématiquement relevés et cartographiés, ce qui a dessiné une chronologie de leur réalisation.

L'étude du métal s'est concentrée, pour sa part, sur les centaines d'agrafes de fer scellées au plomb dans les pierres à hauteur des tribunes et au sommet des murs gouttereaux. Une étude morphologique de ces armatures (dimensions, marques de forge...) a pu être entreprise au fil de la restauration de l'édifice et plusieurs pièces ont fait l'objet d'analyses chimiques et métallographiques (microstructure, composition chimique, datation radiocarbone). Elles révèlent des différences marquées entre les parties méridionales et septentrionales de l'édifice. Les travées les plus occidentales (2 et 3) de la nef se distinguent en outre du reste du vaisseau principal. La datation de trois agrafes des murs bahuts pose un terminus *ante quem* de cette partie de l'élévation.

L'étude du bois s'est enfin portée sur les restes de la charpente du vaisseau principal retrouvés au sol ou sur l'extrados des voûtes. La localisation précise des vestiges après l'incendie, leur numérisation en 3D, l'observation archéologique du débitage et des assemblages retrouvés, le tout éclairé par la monographie de la *forêt* rédigée en 2015 par les architectes R. Fromont et C. Trentesaux, ont permis de pallier la faible proportion subsistante des bois et de restituer la fonction d'une pièce, avant de la dater par dendrochronologie. Ces travaux établissent une chronologie absolue de la charpente disparue. Les bois les plus anciens du vaisseau principal de la nef sont taillés dans des chênes abattus après 1210 et très probablement vers 1214. La charpente est cependant l'objet de modifications, notamment son contreventement vers 1230 (après 1209) et l'ajout de deux entrails vers 1290.

L'ensemble des indices matériels mis en relation les uns avec les autres esquisse un nouveau phasage de la construction, auquel peuvent être associés quelques repères chronologiques fiables.

Affiliation des auteur.es

1 - Université de Franche-Comté/Chrono-Environnement UMR 6249/Besançon

2 - Université Paris 8/ArScAn UMR 7041/Saint-Denis

3 - Université de Bretagne Occidentale/CRBC/Brest

4 - ISEM/CNRS/Montpellier

5 - UMR 7209 AASPE CNRS/MNHN/Paris

6 - Département du Maine-et-Loire/CNRS CReAAH UMR 6566/Angers

7 - Université Paris-Saclay/LAPA, IRAMAT UMR 7065, NIMBE UMR 3685, CEA, CNRS/Gif-sur-Yvette

8 - UVSQ/LMC14, LSCE-IPSL, CEA, CNRS/Gif-sur-Yvette

9 - LRMH, CRC UAR3224, MNHN/Champs-sur-Marne

Polychromie médiévale des portails : analyses physico-chimiques et datations.

Auteur.es de la présentation :

DUCHÊNE S.¹, BELLOT-GURLET L.², BECK L.³, CAFFY I.³, BERNÉ D.⁴, BESNIER C.⁵, CIVALLERI H.⁵, CHAOUI-DERIEUX D.⁶.

RÉSUMÉ :

Au cours des dernières décennies, les études préalables à la restauration des portails des cathédrales gothiques ont mis au jour une riche polychromie médiévale, bien que très souvent fragmentaire. Le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) a réalisé au fil du temps les analyses matérielles de ces vestiges générant une importante documentation (environ quatre-vingts rapports scientifiques) et conservant tous les échantillons et coupes, soigneusement indexés et répertoriés.

Un projet a récemment été mis en place pour revisiter une étude matérielle d'ensemble de la polychromie de la sculpture gothique à la lumière d'une ré-investigation des échantillonnages anciens par les techniques analytiques actuelles et avec l'intégration des nouvelles découvertes. Cette approche a permis de comparer les matériaux et techniques utilisés à travers deux périodes distinctes : le premier art gothique (XII^e siècle) et le gothique classique (XIII^e siècle), avec pour objectif d'identifier des pratiques et de fournir une description de l'évolution des techniques de mise en couleur dans le temps et sur le territoire.

Au sein de ce corpus, la polychromie des portails de la cathédrale Notre-Dame de Paris pour les façades nord (portail du Cloître et Porte rouge) et ouest (portail du Couronnement de la Vierge, portail du Jugement dernier, portail Sainte Anne) tient une place particulière, enrichie par la découverte du jubé médiéval lors des fouilles de la croisée du transept. Ainsi, un corpus exceptionnel d'une centaine d'échantillons analysés a pu être rassemblé pour un même monument.

Les résultats disponibles ont identifié deux principaux types de préparation de la pierre : au blanc de plomb ou à l'ocre jaune. Concernant les pigments ubiquistes, pour les bleus, on distingue ceux issus du lapis-lazuli (outremer naturel) et de l'azurite, et pour les rouges nous retrouvons du vermillon, de l'ocre rouge et des laques rouges. Les nombreuses décorations métalliques sont essentiellement réalisées à la feuille d'or. Des différences marquées apparaissent selon les ensembles de sculptures, ce qui pourrait donner des indications chronologiques sur la mise en œuvre de ces polychromies.

Une collaboration avec le Laboratoire de Mesure du Carbone 14 a enrichi notre arsenal analytique d'un nouvel outil permettant de dater la synthèse des blancs de plomb. En effet, il a été récemment démontré que les carbonates de plomb produits par le procédé ancien de corrosion de plaques de plomb par des produits organiques — vinaigre, produits de fermentation — sont datables par la méthode du carbone 14. L'analyse des rapports isotopiques du carbone fournit ainsi des dates pour la fabrication de ce pigment. Des couches préparatoires prélevées sur des sculptures attribuées au portail du Jugement dernier, au portail Sainte Anne et au jubé médiéval ont été datées, révélant des périodes de fabrication qui pourraient s'étendre du milieu du XI^e siècle au milieu du XII^e siècle.

Affiliation des auteur.es

1 - Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH)/Centre de Recherche sur la Conservation UAR 3224 Ministère de la Culture CNRS MNHN/Pôle scientifique Peinture murale et polychromie/Champs-sur-Marne.

2 - Sorbonne Université, CNRS, De la Molécule aux Nano-objets : Réactivité, Interactions et Spectroscopies, MONARIS UMR8233, Paris.

3 - Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14), LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette.

4 - Musée de Cluny - musée national du Moyen Âge, Paris.

5 - Inrap Île-de-France - Centres de recherches archéologiques, La Courneuve.

6 - Direction régionale des affaires culturelles Île-de-France, service régional de l'archéologie, UMR 7041 ArScAn CNRS, Paris.

Les premiers résultats de l'examen des roses de Notre-Dame de Paris

Auteur.es de la présentation :
BOULANGER, K.

**Affiliation
des auteur.es**

11

CNRS, Centre André-
Chastel, Paris

RÉSUMÉ :

Les trois roses de Notre-Dame de Paris concentrent la quasi-totalité des vitraux médiévaux de l'édifice. L'examen in-situ mené par les historiens d'art du Groupe Verre en 2020 et 2021 a permis de connaître avec précision l'état de conservation des panneaux figurés et d'affiner les études publiées en 1959 par Jean Lafond. L'analyse archéologique montre l'étendue des transformations subies par les œuvres lors des restaurations du XIX^e siècle. Ces modifications ont non seulement touché l'architecture mais aussi les vitraux dont l'organisation a parfois été bouleversée et dont la restauration a aussi été très lourde, notamment dans les roses ouest et sud. La rose nord apparaissait au XIX^e siècle la mieux conservée des trois et ses dispositions furent en effet moins altérées que celles des deux autres. Le degré d'intervention des restaurateurs varia d'une œuvre à l'autre. La moitié supérieure de la rose ouest fut lourdement restaurée, avec plusieurs scènes entièrement refaites, tandis qu'on laissa telle quelle ou presque la moitié inférieure, certainement parce qu'elle était cachée par l'orgue et que l'on pouvait ainsi faire quelques économies. Elle seule peut encore témoigner des travaux entrepris sur ces vitraux avant le XIX^e siècle puisque ces panneaux ne furent pas « dérestaurés ». Le sort des vitraux de la rose sud fut en partie scellé par les modifications drastiques apportées à l'architecture et qui entraînèrent la reprise d'une bonne partie des panneaux. Le vitrage de cette rose n'a parfois plus grand-chose à voir avec ce qu'il avait été au Moyen-Âge. Le constat de l'état de conservation permet ainsi de comprendre comment ont travaillé les restaurateurs mais aussi de projeter un autre regard sur les œuvres médiévales en déterminant ce qui appartient véritablement à l'œuvre originelle et ce qui résulte de l'imagination des hommes du XIX^e siècle.

Stratigraphie des dépôts et décors des vitraux de Notre-Dame – Analyse par faisceau d'ions à New AGLAE

Auteur.es de la présentation :

TAZZIOLI A.^{1,2}, PACHECO C.², LEMASSON Q.², PICHON L.², GIRARD A.³,
MOIGNARD B.², LOISEL C.^{4,5}

RÉSUMÉ :

A la suite de l'incendie de Notre-Dame de Paris, les vitraux des baies hautes de la nef ont été déposés afin de libérer l'accès à la voûte et permettre sa restauration. D'épaisses croûtes noires ont été retrouvées à leur surface. Comment se sont-elles formées ? Quelle est leur stratigraphie ? Peut-on remonter à l'environnement dans lequel la cathédrale a évolué depuis 1861 en reconstruisant la chronologie de déposition des particules ? De nombreuses questions se posent aussi concernant les vitraux de Maréchal de Metz : quelle est la composition des verres et des décors peints ? Peut-on déterminer la provenance des verres ? leur altération ? les techniques de fabrication des panneaux ?

Ces questions sont à l'origine de la mise en place d'un projet de thèse entre le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), le Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF) et EDF R&D. Il est co-financé par le Ministère de la Culture et la Fondation EDF à travers un mécénat de compétences. Il a pour objectif d'optimiser le traitement de l'imagerie par faisceau d'ions à New AGLAE afin de reconstruire rapidement la stratigraphie des objets analysés.

En effet, l'accélérateur de particules New AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire) au C2RMF permet d'analyser ces objets du patrimoine de façon non invasive et non destructive. Les techniques PIGE (Particle Induced Gamma-ray Emission) et PIXE (Particle Induced X-ray Emission) rendent compte de leur composition chimique élémentaire. Utilisées de façon combinée avec la RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy), ces techniques d'analyse permettent de reconstruire la stratigraphie de la surface des œuvres. Néanmoins, les objets du patrimoine sont souvent très hétérogènes : des analyses cartographiques représentant la répartition spatiale et en profondeur des éléments chimiques présents dans la zone analysée sont nécessaires. Les temps de calculs avec les logiciels classiques sont alors bien trop longs pour être utilisables au quotidien.

Pour pallier ce problème, l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle a montré des résultats très encourageants en accélérant certaines étapes du traitement. La méthodologie a été développée sur des échantillons du patrimoine bien documentés et validée sur des échantillons parfaitement connus. Elle nous a permis d'étudier les dépôts qui recouvraient les panneaux avant nettoyage ainsi que les verres et les décors après nettoyage. Cette communication orale présentera l'état d'avancement du projet de thèse et les premiers résultats obtenus.

Affiliation des auteur.es

1 - Université PSL, IRCP, Paris.

2 - Lab-BC UAR3506, C2RMF, CNRS/MC/ENSCP-PSL, Paris.

3 - EDF R&D, Chatou.

4 - Centre de Recherche sur La Conservation, UAR3224, Sorbonne Universités, Muséum national d'Histoire naturelle, Ministère de La Culture, CNRS, Paris.

5 - Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, Champs-sur-Marne.

Interaction plomb-matériaux à Notre-Dame

Auteur.es de la présentation :

GODET M.^{1,2}, LOISEL C.^{1,2}, AZÉMA A.^{1,2}, VERGÈS-BELMIN V.^{1,2}, CHABAS A.³,
VERNEY-CARRON A.³, MENGUY N.⁴

RÉSUMÉ :

Le 15 avril 2019, l'incendie de la cathédrale Notre-Dame a détruit la quasi-totalité de la toiture en plomb de l'édifice. Le plomb fondu s'est dispersé sous forme de particules dans le nuage de fumée et a réagi avec les matériaux environnants (pierre, verre et métal) pour former des dépôts plombifères de nature inconnue. Ce projet vise à caractériser la nature chimique et structurale de ces composés plombifères (particules et dépôts) pour déterminer les mécanismes à l'origine de leur formation et évaluer leur interaction avec les matériaux supports. Les composés plombifères ont été caractérisés à l'aide d'un panel de techniques complémentaires et multi-échelles (granulométrie laser, ICP-AES, DRX, Raman, microscopies optique et électroniques MEB/MET). Les résultats montrent que les particules provenant du nuage de fumée sont très riches en plomb (jusqu'à 20% massique) et sont constituées d'un assemblage de minéraux plombifères (essentiellement massicot, litharge, plomb métallique et plumbate de calcium) de taille micro- et nanométrique. Concernant les dépôts formés sur la pierre et le verre (du pignon ouest), ils sont extrêmement hétérogènes et leur nature chimique et structurale dépend de chaque type de substrat. Pour la pierre, la formation d'une couche épigénique de plumbate de calcium et le dépôt de particules de massicot, d'anhydrite, d'hydrocérussite et de plattnérite provenant de sources externes (probablement de la chape de plâtre et des aérosols de la fumée) ont été mis en évidence. Pour le verre, une diffusion du plomb en surface (allant de 1 à 50 µm) et la présence de microcristaux de dévitrification (wollastonite, silicates de plomb, etc.) est constatée. Pour le métal, un dépôt jaune observé sur une crête de faitage en fer tombée sur la voûte à la croisée des transepts a été analysé et est constitué principalement de massicot englobant des billes de plomb métallique. Ces résultats sont encore en cours d'interprétation afin de déterminer les mécanismes à l'origine de la formation de ces composés et identifier les conséquences en termes d'altération esthétique et de dégradations physico-chimiques des différents matériaux.

Deux articles sont en cours de rédaction pour Atmospheric Environment (Multi-scale characterization of lead-rich deposited particles originating from the fire of Notre-Dame de Paris) et Journal of Cultural Heritage (Lead impact on stone during the fire of Notre-Dame de Paris) et un troisième sur les altérations subies par le verre est prévu pour 2025. Un court-métrage sur ce projet, focalisé sur le métier de scientifique de la conservation est en cours de réalisation par 7 Points Productions grâce au soutien financier du chantier scientifique (GT métal et verre), de la société française des microscopies (SFMU) et du DIM-PAMIR.

Affiliation des auteur.es

1 - Centre de Recherche sur La Conservation, Sorbonne Université, Muséum national d'Histoire naturelle, Ministère de La Culture, CNRS UAR 3224, Paris.

2 - Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, Champs-sur-Marne.

3 - Université Paris Est Créteil et Université Paris Cité, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, CNRS UMR 7583, Créteil.

4 - Sorbonne Université, Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, CNRS UMR 7590, Paris.

Effet de l'incendie sur un ensemble voûte-contrebutements du chœur de Notre-Dame

Auteur.es de la présentation :

MORENON P.¹, MINDEGUIA J.C.², PARENT T.², COLAS, A.-S.³, DUBOIS, F.⁴, GARNIER, D.⁵, MOREL, S.², NOUGAYREDE, P.⁶, TAFOREL, P.⁷

RÉSUMÉ :

Après l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris, une phase de diagnostic structurel approfondi de la cathédrale — menée sous la responsabilité de la maîtrise d'œuvre (MOE) pour le compte de la maîtrise d'ouvrage — a été réalisée : cette phase faisant directement suite aux opérations d'urgence visant à assurer la mise en sécurité du site et des intervenants (démontage de l'échafaudage, renforcements, étalements, protocole plomb...). La compréhension des effets de l'incendie sur la structure s'est révélée être un point clé de ce diagnostic, permettant de discuter les choix de solutions de renforcement. Le diagnostic structurel des voûtes en place s'est déroulé en trois étapes selon une méthodologie construite autour d'échanges entre le GT « Structures » et la MOE :

(i) Le rassemblement des données existantes et pertinentes, issues de relevés sur site ou de la bibliographie, comme les observations d'altérations post-incendie en extrados (délamination, écaillage, fissuration), le déplacement résiduel avant/après incendie de la voûte par comparaison de nuages de points, la dégradation des propriétés mécaniques et les dilatations thermiques de la maçonnerie (pierres et joints) en température.

(ii) La réalisation de mesures in situ ou en laboratoire à l'instar des techniques expérimentales et numériques ayant permis d'estimer le champ de température potentiellement atteint dans les pierres des voûtes suite à l'incendie. Cette technique se base sur la colorimétrie de la pierre calcaire suite à son échauffement ; se reposant sur le fait que les transformations physico-chimiques au sein de la pierre calcaire modifient ses propriétés colorimétriques de manière irréversible avec la température. Les mesures expérimentales sur carottes prélevées in-situ dans une voûte sont complétées par des reconstructions numériques des profils de température dans l'épaisseur des pierres.

(iii) La modélisation thermomécanique de la voûte pendant l'incendie en prenant notamment en compte les dilatations thermiques. Les résultats de calculs sont comparés aux données en termes de déplacement vertical de la voûte avant/après incendie et de fissurations de la voûte, des murs gouttereaux et bahuts. Cette comparaison permet d'attester du réalisme du modèle à reproduire les principaux phénomènes mis en jeu lors de l'incendie. Une analyse de la poussée générée dans les arcs-boutants lors de l'incendie est également effectuée. Aucune instabilité de la structure n'est observée.

Cette méthodologie basée sur les observations de la structure, la réalisation de mesures complémentaires, la bibliographie et la modélisation avancée du comportement thermomécanique permet de valider la compréhension des principaux phénomènes mis en jeu lors de l'incendie. Des solutions de renfort ont été mises en place par la MOE comme des purges, des reprises et injections des fissures ou des changements de pierre ainsi que la réalisation d'une chape en extrados des voûtes.

Affiliation des auteur.es

1 - LMDC, Université de Toulouse, UPS, INSA, Toulouse, France

2 - Université de Bordeaux, UMR5295, Bordeaux, France

3 - GERS-RRO, Université Gustave Eiffel, Université de Lyon, Lyon, France

4 - LMGC, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

5 - Navier, École des Ponts ParisTech, Université Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France,

6 - GSA, École Nationale Supérieure d'Architecture Paris Malaquais, Université PSL, Paris, France,

7 - MiMeTICS engineering, Montpellier, France

Comportement d'un élément de voûte de Notre-Dame de Paris en condition incendie. Du laboratoire à la maquette pleine échelle

Auteur.es de la présentation :

HUBY E.¹, GIOVANNACCI D.¹, MERTZ J-D.¹, LOGEL S.², LORENTZ C.², LHOMME J.², RANGEARD D.³, COLLIGNON C.⁴, TESSIER C.⁴, LE BARON J-M.⁵, MAHIAS G.⁶, OPSOMMER A.⁶, MÉLINGE Y.¹, MAGNIEN A.¹

RÉSUMÉ :

Lors de l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris, les voûtes ont été fortement sollicitées thermiquement et mécaniquement. S'agissant de leur restauration et de leur renforcement, il est primordial de comprendre le comportement des matériaux face à un éventuel futur incendie et de mettre au point des systèmes de protection. Une étude a ainsi été mise en place afin de mieux comprendre le comportement thermo-hydro-chemo-mécanique des matériaux constitutifs de la voûte à haute température et de mettre au point une solution passive minérale adaptée aux matériaux et aux contraintes liées à leur emplacement sur les voûtes.

Dans un premier temps, les matériaux constitutifs ont été caractérisés en laboratoire, à la micro- et à la méso-échelle. Ces essais ont permis une première approche afin de définir le comportement thermo-chimique, l'évolution du milieu poreux, de la micro-structure ainsi que des propriétés mécaniques en fonction de la température. Des cinétiques d'endommagement ont ainsi pu être identifiées, ce qui a permis d'établir des seuils de température avant dégradation des matériaux. Dans un second temps, des essais feu à la macro-échelle ont été mis au point consistant à chauffer des panneaux de 55x55cm d'épaisseur constante posés sur un four horizontal, en imposant sur la surface exposée une évolution de la température reproduisant le standard ISO 834. Le suivi en température pendant les essais et les analyses effectuées après la chauffe sont reliés aux résultats de la micro- et méso-échelles afin d'interpréter les mécanismes d'endommagement mis en jeu. L'ensemble des résultats obtenus a permis de développer une solution de protection passive minérale compatible avec les matériaux pré-existants et garantissant l'intégrité de ces matériaux pendant plusieurs heures.

L'étape finale de validation a consisté à développer un essai feu à la pleine échelle reproduisant des conditions de feu réalistes. Une maquette (3,35x1,25 m ; Rayon de courbure de 22 m) a été conçue utilisant des pierres calcaires sur laquelle ont été appliqué un mortier de renforcement et la protection passive mise au point. La configuration de l'essai feu, réalisé au sein du CERIB, a permis de reproduire le standard ISO 834 sur la face extrados de la voûte. A notre connaissance, un tel essai est, dans le contexte patrimonial, original. Pendant plusieurs heures, la résistance au feu est étudiée au travers de l'évolution du transfert thermique, des champs de déformations, des conditions d'empêchement via les transferts de charge et en considérant les effets induits par les changements de phases des matériaux constitutifs de la voûte. Ces travaux représentent une aide à la prise de décision multi-critères et multi-échelles pour la protection des voûtes de la cathédrale Notre Dame de Paris et constituent une base de travail pour d'autres monuments.

Affiliation des auteur.es

- 1 - Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, CRC - MNHN, CNRS, Ministère de la Culture - UAR 3224/Champs sur Marne.
- 2 - BPE Laboratoires /Dimbsthal.
- 3 - Laboratoire CBTP/Noyal-sur-Vilaine.
- 4 - CERIB/Epernon.
- 5 - LEFEVRE/Gennevilliers.
- 6 - Promat, ETEX/Tisselt

La mise en œuvre des métaux à Notre-Dame de 1160 à aujourd'hui.

Auteur.es de la présentation :

AZÉMA A.¹, BERNARD M.², L'HÉRITIER M.³, SYVILAY D.⁴, DILLMANN P.²

Affiliation des auteur.es

16

RÉSUMÉ :

Le chantier de restauration de Notre-Dame de Paris a révélé l'importance des rôles joués par les différents métaux (fer, plomb, alliages cuivreux) dans la structure et l'ornementation de la cathédrale, depuis ses premières phases de construction, jusqu'aux grandes restaurations des XIX^e, XX^e et XXI^e siècles. Des armatures de fer mises en œuvre dès les années 1160 pour renforcer certaines parties de l'édifice, à la couverture en plomb commandée par Maurice de Sully dans son testament en 1196, aux crêtes de faîtage installées par E. Viollet-le-Duc dans la seconde moitié du XIX^e siècle, la présente communication dépeindra un panorama chronologique de ces différents usages avec l'ambition de comprendre la place que ces matériaux occupent dans l'histoire de l'édifice.

L'incendie a mis au jour l'usage d'un grand nombre d'armatures de fer dans le chantier médiéval de la cathédrale, en particulier sous la forme d'agrafes, afin de liaisonner les blocs de pierre à des endroits spécifiques de l'édifice. Première « dame » de fer gothique, Notre-Dame dissimule toutefois son squelette de fer, au contraire du plomb, valorisé pour des usages à la fois techniques (souplesse de joints de plomb favorisant le tassement des maçonneries), ou ostentatoires (couverture et décors en plomb). Au cours des restaurations du XIX^e siècle, les métaux ont également joué un rôle primordial à la fois dans la consolidation des charpentes et des maçonneries, et ont participé aussi pleinement des techniques traditionnelles remises en avant par E. Viollet-le-Duc dans sa vision de la restauration. La refonte de la couverture pour l'élaboration de nouvelles tables coulées sur sable et la mise en œuvre de crêtes de faîtages composées de coques de plomb battu renforcées par des armatures de fer en sont les parangons. Enfin, dans le chantier de restauration actuel où les formes sont reproduites à l'identique, la question du réemploi des matériaux a été portée assez tôt par la maîtrise d'œuvre. Les métaux apparaissent comme les principaux vecteurs de ce réemploi, selon des techniques de remise en œuvre parfois diverses, mais porteuses de sens quant à la perdurance de l'identité de l'édifice.

1 - LRMH, CRC UAR3224, MNHN/Champs-sur-Marne

2 - Université Paris-Saclay/LAPA, IRAMAT UMR7065, NIMBE UMR3685, CEA, CNRS/Gif-sur-Yvette

3 - Université Paris 8/ArScAn UMR7041, CNRS/Saint-Denis

4 - Sorbonne Université Abu Dhabi/Emirats Arabes Unis

La pierre et sa mise en œuvre sur le chantier médiéval de Notre-Dame, aspects archéologiques et tracéologiques

Auteur.es de la présentation :

HARTMANN-VIRNICH A.¹, MOULIS C.²

**Affiliation
des auteur.es**

17

RÉSUMÉ :

La présence d'échafaudages couvrant une large partie des élévations de la cathédrale parisienne a permis d'examiner en détail la surface des pierres composant les structures bâties, et d'entreprendre une étude chronotypologique des traces laissées par l'impact des outils des tailleurs de pierre et des sculpteurs. Pour l'ensemble du vaisseau central, de l'espace central du transept et de celui du chevet, une cartographie exhaustive pierre-à-pierre, réalisée à partir d'une couverture photogrammétrique et scannergraphique générale spécifique au GT Pierre, a donné lieu à une identification de différents faciès qui se distinguent par la répartition des traces d'outil à tranchant lisse ou denté, par la densité et l'orientation des coups portés par les tailleurs de pierre, révélant entre autres des différences entre les appareils et la modénature de la construction primitive, ceux des reprises en sous-œuvre liées à la réalisation des baies rayonnantes, et ceux des restaurations des XVIII^e et XIX^e siècles.

Le relevé, la cartographie et l'étude des signes lapidaires, dont la présence localisée s'accorde à certaines phases de la mise en œuvre, révèle à son tour la coexistence de différentes techniques de taille du signe : éraflure à la pointe, coups de ciseau juxtaposés, ou incision de sillons en « V ». L'étude de surfaces cachées des claveaux et voussoirs des XII^e et XIII^e siècle a révélé une utilisation préférentielle d'outils à larges dents dans le but de favoriser l'adhérence du mortier, la présence de croix de montage, dans le cas du doubleau effondré de la nef, et la taille d'abreuvoirs sur les faces de joint de la clef d'arc conformément au rôle spécifique de cette dernière. L'étude des nervures au moment du rejointoiement a, tout particulièrement, révélé la présence de plusieurs types de systèmes de rainures ou d'encoches taillées après la pose pour engager dans leur lit d'attente des bois servant au cintrage de la partie sommitale des voûtaings.

Un relevé manuel des systèmes de lignes tracées et incisées dans le lit d'attente des tailloirs recevant les nervures des voûtes sexpartites a mis en évidence plusieurs interventions successives des ouvriers au cours de la mise en œuvre, à partir d'un premier tracé d'épure définissant les contours et marquant le porte-à-faux du débord, suivi de différents systèmes de trait marquant l'emplacement et l'emprise des sommiers des nervures avant et pendant la mise en place de ces dernières. L'enchevêtrement des tracés révèle un écart considérable entre le projet et l'exécution des voûtes du haut-vaisseau dont les nervures furent, à la différence notable de celles du chevet déjà en place, considérablement épaissies, en portant à une même largeur les doubleaux et les ogives transversales pour renforcer la structure en rompant avec le rythme binaire de la double travée. L'analyse apporte de ce fait d'importants éléments inédits à une nouvelle approche de l'évolution du projet entre sa conception et sa réalisation.

1 - Aix-Marseille
Université/Laboratoire
d'archéologie médiévale
et moderne en
Méditerranée LA3M UMR
7298/Aix-en-Provence.

2 - Université de
Lorraine/UR 1132
SAMA/Nancy

Des charpentiers à l'œuvre. Rencontres autour de l'épure.

Auteur.es de la présentation :

MONFERRAN J.-C.¹, VOISENAT C.².

**Affiliation
des auteur.es**

18

RÉSUMÉ :

La reconstruction à l'identique de la charpente a imposé le recours (et parfois la redécouverte) de techniques traditionnelles, dont la plus importante, et la moins médiatisée du fait de sa complexité, est le tracé d'une épure. Cette technique relève de l'art du trait de charpente, inscrit depuis 2009 sur la liste du patrimoine culturel immatériel de l'Unesco au titre des savoir-faire. Le trait se développe à partir du XIII^e siècle, en lien avec l'édification des monuments gothiques ; partie intégrante de la formation des compagnons charpentiers, il connaît son apogée au XIX^e siècle, avec les deux traités les plus connus, de Mazerolle et des frères Billon.

L'épure est un tracé, permettant de rabattre sur un plan, en deux dimensions, une structure complexe à trois dimensions. Dessinée à différentes échelles, elle est *in fine* tracée au sol où elle permet de positionner les pièces de bois les unes par rapport aux autres, de les ligner et de les piquer, afin que les assemblages soient taillés en prenant en compte les gauchissements et les irrégularités du bois qui pourraient les empêcher d'être parfaitement jointifs. La charpente est ainsi préparée en atelier avec une extrême précision de manière à s'emboîter parfaitement et rapidement lors de son montage définitif sur l'édifice.

Se situant au niveau de l'exécution, tenant compte des côtes et des sections dans la perspective de la taille et de l'assemblage des pièces de bois, l'épure ne rentre pas dans la formation théorique et pratique de l'architecte et, quoique toujours inscrit dans les référentiels de formation aux CAP et BP e charpenterie, le trait est de moins en moins pratiqué du fait de la standardisation des bois de construction, du développement des logiciels 3D et de l'utilisation des machines de taille à commande numérique.

A Notre-Dame, le recours à l'épure a été particulièrement important pour la reconstruction de la flèche, ouvrage d'une extrême complexité et s'est retrouvée au cœur des discussions entre charpentiers, architectes et ingénieurs des bureaux d'étude, mettant en évidence les difficultés et les paradoxes d'une reconstruction à l'identique mais respectueuse des normes (de sécurité par exemple) des sociétés contemporaines.

Circulant entre les métiers et leurs enjeux, l'épure de la flèche de Notre-Dame a aussi circulé entre les générations : pour la concevoir il a en effet fallu recourir aux archives de Viollet-le-Duc et de l'entreprise Bellu, dont le gâcheur Henri Georges, un compagnon dit Angevin l'enfant du génie, avait réalisé la flèche originelle et travailler également d'après l'épure dessinée en 1970, à partir d'un relevé détaillé de la flèche, par trois aspirants compagnons qui en avaient réalisé la maquette comme travail de réception. Mais ce qui s'est transmis entre ces générations à travers la logique de construction de la flèche c'est plus qu'un savoir-faire, peut-être surtout un état d'esprit, marqué par les valeurs du compagnonnage.

1 - UMR 9022,
Héritages/Ministère de la
Culture/Cergy-Pontoise.

2 - UMR 9022,
Héritages/CNRS/Cergy-
Pontoise.

D'où venait le fer de Notre-Dame ? Enquête archéologique et archéométrique sur le chantier des XII^e et XIII^e siècles.

Auteur.es de la présentation :

BERNARD M.¹, L'HÉRITIER M.², BECK L.³, DELQUÉ-KOLIC E.³, AZÉMA A.⁴,
LORQUET P.⁵, BAUVAIS S.⁶, DILLMANN P.¹

RÉSUMÉ :

Les analyses archéométallurgiques d'une grande diversité de mobilier ferreux découverts dans la structure de Notre-Dame de Paris permettent aujourd'hui de poser un nouveau regard sur l'approvisionnement du chantier de la cathédrale, notamment aux XII^e et XIII^e siècles. En effet, l'étude de ces armatures contribue non seulement à la compréhension du monument dans son ensemble mais dévoile également des pratiques économiques et sociales telles que la production et la circulation des métaux. L'indigence des sources textuelles concernant l'approvisionnement en fer du chantier de construction à ces périodes a conduit les chercheurs du groupe « Métal » du chantier scientifique de Notre-Dame à s'appuyer sur des méthodologies archéométriques, couplées à une approche morphologique du mobilier et à la connaissance du contexte archéologique de production du métal, pour tenter de déterminer l'origine du fer utilisé dans la construction de la cathédrale.

Le corpus étudié dans ce contexte se compose d'agrafes en fer situées dans la maçonnerie des murs gouttereaux, d'agrafes provenant des tribunes, ainsi qu'une agrafe issue d'une colonne monolithique d'une chapelle. S'y ajoutent d'anciennes barres de vitraux des baies hautes et des goujons retrouvés dans les piles du déambulatoire du chœur, servant à ancrer d'anciens tirants de bois juste au-dessus des chapiteaux. Cette cinquantaine d'armatures de fer couvrent l'ensemble du chantier de construction des années 1160 aux années 1220-1230. Les inclusions de scories contenues dans la matrice de ces alliages ferreux ont été analysées par LA-ICP-MS pour accéder à leur composition en éléments traces et tenter de déterminer la provenance du métal. Ces impuretés renferment en effet des informations chimiques héritées de la composition du minerai de fer utilisée pour fabriquer ces matériaux. Parallèlement, les scories de réduction de 32 sites de production du fer connus par l'archéologie en région francilienne ont été analysées (MC-ICP-MS). Ces sites médiévaux constituent un référentiel en cours de construction, nous permettant de comparer leur signature chimique en éléments traces au cas de Notre-Dame et de formuler des hypothèses de provenance de ce mobilier ferreux. L'étude combinée des signatures chimiques du métal et de la scorie de réduction sera mis en évidence grâce à l'utilisation de traitements multivariés des données chimiques, notamment par l'emploi de méthodes statistiques comme l'ACP (Analyse en Composantes Principales), l'analyse des clusters ou encore l'utilisation d'algorithmes de réduction de dimension tel que t-SNE (t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding) et UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection). Cette approche, conjuguée aux études archéométriques du mobilier ferreux de Notre-Dame de Paris, montrent une grande diversité de provenances et renouvellent notre compréhension de la circulation et du commerce du fer dans le Paris médiéval.

Affiliation des auteur.es

1 - Université Paris-Saclay/LAPA, IRAMAT
UMR7065, NIMBE
UMR3685, CEA,
CNRS/Gif-sur-Yvette

2 - Université Paris
8/ArScAn UMR7041,
CNRS/Saint-Denis

3 - UVSQ/LMC14,
LSCE-IPSL, CEA,
CNRS/Gif-sur-Yvette

4 - LRMH, CRC UAR3224,
MNHN/Champs-sur-
Marne

5 - INRAP/Paris

6 - CRFJ, UMIFRE
n°7, CNRS, MEAE,
UAR3132/Jérusalem, Israël

De la forêt à la charpente. Etudier la provenance des bois médiévaux par le croisement des données dendrochronologiques, chimiques/isotopiques, archéologiques et historiques.

Auteurs de la présentation :

POSZWA A.¹, IMBERT STULC A.², HUNOT J.-Y.³, BERTHIER K.⁴, BOUCHEZ J.⁵, PONTON S.⁶, DUPOUEY J.-L.⁶, GIRARD CLOS O.⁷, PENAGOS C.⁷, COUBRAY S.^{2,8}, GARNIER E.⁷, NGUYEN TU T. T.⁹, DUFRAISSE A.²

RÉSUMÉ :

La charpente en chêne de Notre-Dame de Paris (NDP), construite au Moyen Âge, entre le XII^e et le XIII^e siècle, est l'un des plus grands chefs-d'œuvre de la charpenterie gothique en France. Cependant, la provenance géographique des bois utilisés pour sa construction n'est attestée par aucune archive textuelle et n'a fait l'objet d'aucune étude approfondie avant l'incendie du 15 avril 2019. Bien qu'il soit possible de proposer des zones de provenance géographique à partir des largeurs de cerne, cette approche nécessite des référentiels dendrochronologiques contemporains dans des régions variées, dont nous ne disposons pas encore. Dans ce contexte, nos travaux ont pour objectif de préciser l'origine géographique des bois qui ont servi à construire les charpentes médiévales de NDP, par une approche intégrée combinant des données de chimie et isotopie du bois, d'archéologie et d'histoire. Certaines archives historiques suggèrent qu'à l'époque du chantier, un approvisionnement en bois lointain était probable en raison de pénuries dans les forêts franciliennes. Nous avons donc envisagé une aire d'approvisionnement sur l'ensemble du Bassin de la Seine. À cette échelle, les bois d'arbres issus de 12 forêts actuelles, représentatives des grands types de roches et de sols de la région, ont été étudiés. Des traceurs chimiques et isotopiques ont été identifiés pour discriminer la plupart de ces forêts de référence. Parallèlement, les bois médiévaux ont été associés à différentes phases d'abattage par analyse dendrochronologique. Ils ont été localisés (chœur ou nef) et leur fonction a parfois été identifiée. Les analyses chimiques et isotopiques de ces bois ont permis de mettre en évidence qu'une majorité des vestiges présentait des signatures caractéristiques de forêts sur sols limoneux, assez répandues autour de Paris. Cela confirme certaines sources historiques mentionnant que des forêts proches de Paris, sur sols limoneux, ont été sollicitées. Par exemple, en 1279, les moines de Saint-Maur autorisent les chanoines de NDP à utiliser le port de Brétigny, à Sucy-en-Brie, afin de charger sur des bateaux les pièces de bois provenant du « bois de Sucy », propriété du chapitre.

Cependant, les signatures chimiques et isotopiques mesurées dans les bois archéologiques ne convergent pas toutes vers les mêmes valeurs et suggèrent (i) que les sources d'approvisionnement n'étaient pas uniques sur une même phase d'abattage, (ii) que les provenances ont évolué au cours du temps. Par ailleurs, l'examen des vestiges carbonisés de NDP a révélé des indices de transport par flottage sur neuf éléments. Ces bois se répartissent au sein des diverses phases de construction de la charpente des XII^e et XIII^e siècles. Bien que ne permettant pas encore de préciser la distance sur laquelle ont été transporté les bois, ces observations prouvent que le flottage était un mode de transport couramment pratiqué sur l'ensemble de la période de construction du chantier.

Affiliation des auteurs

1 - Université de Lorraine/LIEC UMR 7330 CNRS-UL/Nancy

2 - UMR 7209 AASPE CNRS/MNHN/Paris

3 - UMR 6566 CReAAH CNRS/Département de Maine-et-Loire

4 - Inrap

5 - Université de Paris Cité/Institut de physique du globe de Paris/CNRS/Paris

6 - INRAE/SILVA UMR 1434 (INRAE)/Nancy

7 - Chrono-Environnement, Besançon

8 - Inrap Centre - Île-de-France/Pantin

9 - Sorbonne Université/METIS UMR 7619 (CNRS, EPHE, PSL)/Paris

La pierre sur le chantier de Notre-Dame du Moyen Âge au XIX^e siècle : identification, usages, approvisionnement.

Auteur.es de la présentation :

LEROUX L.¹, GÉLY J.-P.²

**Affiliation
des auteur.es**

21

RÉSUMÉ :

Le malheur de l'incendie de la cathédrale de Paris en avril 2019, a conduit à un travail d'identification des pierres utilisées dans le monument depuis les débuts de son édification. Cela était nécessaire avant la restauration, et ce sont les zones les plus touchées qui ont été étudiées en priorité, néanmoins l'accès de manière rapprochée à l'ensemble de l'édifice a permis des observations plus larges, vers une meilleure connaissance historique et archéologique.

Ces observations viennent corroborer celles déjà réalisées depuis des dizaines d'années, notamment par les géologues du LRMH (Laboratoire de recherche des monuments historiques) lors des divers travaux de restauration qui se sont succédé depuis les années 1970. Citons à titre d'exemple, la restauration de la Porte Rouge.

Depuis 2019, c'est en particulier l'effondrement des voûtes qui a apporté des informations sur la construction, d'autant plus que cela se situe en trois zones principales correspondant à des périodes de construction différentes : la croisée du transept (XIX^e s.), un voutain du bras nord du transept (XVIII^e s. ?), un voutain et un arc doubleau de la partie orientale de la nef (XIII^e s.). A cela s'ajoute quelques trous au niveau du rond-point du chœur (XIII^e s.). Les vestiges ont été étudiés et des analyses pétrographiques réalisées, avec en appui quelques documents du XIX^e s. citant des carrières.

Pour la nef, les carrières parisiennes ont été sollicitées ; les Bancs francs du Lutétien supérieur et les Lambourdes du Lutétien moyen se côtoient. Au niveau du chœur, partie plus ancienne, la variété des lithofaciès est plus grande, avec entre autres des Lambourdes issues de zones éloignées de Paris. Dans le bras nord du transept, des reprises en calcaires lutétien contenant des alvéolines associés à un cortège quartzeux et glauconieux (calcaire zoogène du Vexin, dans un faciès tendre) sont attribuables au XVIII^e s.

La reconstruction de la croisée au XIX^e s. est bien documentée, réalisée avec de la pierre neuve de Vergelés (Lutétien moyen de la vallée de l'Oise et du Val d'Oise) pour les voutains, et des réutilisations du préexistant pour les arcs diagonaux, du XVIII^e s. en calcaire dur du Vexin, déposés et reposés par Viollet-le-Duc.

Indépendamment de l'étude des vestiges, les investigations sur les échafaudages ont montré l'existence dans l'édifice d'un calcaire à lucines blanches qui, dans les voutes et le déambulatoire du chœur et de la première travée orientale de la nef, trace vraisemblablement la première phase de construction du XIII^e s.

1 - Laboratoire de
recherche des monuments
historiques/CRC-
UAR3224/Champs-sur-
Marne.

2 - Laboratoire de
Médiévisque occidentale
de Paris, Panthéon-
Sorbonne/LAMOP-UMR
8589 CNRS, Université
Paris 1/Paris.

Apport d'une recherche interdisciplinaire à la connaissance de la couverture en plomb contemporaine de Notre-Dame de Paris.

Auteur.es de la présentation :

DAUSSY, D.¹, BARON, S.², SARAH, G.³, LESTEL, L.⁴, AZÉMA, A.⁵, L'HÉRITIER, M.⁶.

Affiliation des auteur.es

22

RÉSUMÉ :

Le plomb est un métal très employé dans la construction monumentale et fait partie intégrante de la culture matérielle. Les exégètes, depuis l'Antiquité, l'ont d'ailleurs privilégié pour les couvrements de prestigieux édifices. Aussi, à Notre-Dame, les archives témoignent de son utilisation pour couvrir l'édifice depuis le XII^e s. jusqu'aux plus récentes restaurations. Viollet-le-Duc et Lassus, dès 1845, mettent en œuvre plus de 200 tonnes de plomb, en partie recyclé, sur toutes les parties de couverture, du comble à la flèche.

L'archéologie et l'histoire de la construction avaient déjà interrogé cet usage. Les marchés d'approvisionnement et leurs évolutions nécessitaient cependant de mener une approche interdisciplinaire et de travailler sur un échantillonnage substantiel. L'incendie de 2019 a ainsi permis de constituer un corpus de près de 300 objets en plomb des XII-XIII^e s. et XIX^e s., étudiés via une approche mobilisant des analyses multi élémentaires et isotopiques, archivistiques et archéologiques. Les analyses chimiques multi élémentaires ont été conduite par LA-ICP-MS et les analyses isotopiques du plomb par MC-ICP-MS. Les études archivistiques ont été menées dans les fonds de l'agence de Viollet-le-Duc et Lassus, dans d'autres monuments contemporains mais aussi dans l'administration du commerce et de l'industrie, des Affaires étrangères, des Mines et des entreprises.

Les analyses chimiques multi-élémentaires révèlent la pratique du recyclage du plomb par la présence d'étain, notamment pour la couverture (teneur médiane de ~ 4000 ppm). Les analyses isotopiques du plomb mettent en lumière des modalités d'approvisionnement différentes entre le XII^e s. et le XIX^e s., renouvelant ainsi notre compréhension de l'édifice. Ainsi, la signature isotopique du plomb des scellements (XII^e-XIII^e s.) traduit une source relativement homogène ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} : 18,46 \pm 0,03$), radiogénique, unique et cohérente au niveau de la nef notamment. La signature isotopique de la couverture est très étendue ($17,70 < ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18,45$) et semble traduire une source commune avec une proportion dominante de plomb issu de minerais des grands gisements andalous (Sierra Morena notamment), grâce au dynamisme des échanges franco-espagnols sous le second Empire. Les signatures isotopiques du plomb de la couverture de la flèche et de ses décors sont parmi les plus radiogéniques de la cathédrale ($18,40 < ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18,60$) et semblent traduire également une origine hispanique (Sierra de Cartagena).

La signature isotopique de la couverture semble avoir été très peu altérée par le recyclage d'anciens plomb. Malgré des teneurs en étain élevées, les signatures mettent en lumière une contribution dominante de plomb d'origine hispanique. L'analyse des différents fonds d'archives cités, mais aussi des revues commerciales, croisée à la recherche dans les registres de cabotage, permet de confirmer une provenance andalouse du plomb vers laquelle orientait l'isotopie tandis que les sources d'entreprises participent à éclairer le recyclage des plombs anciens.

1 - Université de Picardie
Jules-Verne, EA 4286,
Amiens.

2 - Université de Toulouse,
CNRS, TRACES UMR
5608, Toulouse.

3 - Université d'Orléans,
CNRS, IRAMAT UMR
7065, Orléans.

4 - Sorbonne Université,
CNRS, METIS UMR 7619,
Paris.

5 - LRMH, CRC UAR
3224, Paris.

6 - Université de Paris 8,
ArScAn CNRS UMR 7041,
Paris.

Donateurs, scieurs, charpentiers et scientifiques : variations sur les origines des bois de Notre-Dame

Auteur.es de la présentation :
VÉRONIQUE DASSIÉ¹

**Affiliation
des auteur.es**

23

RÉSUMÉ :

Cette communication propose de revenir sur les modalités de l'approvisionnement en bois de la cathédrale Notre Dame de Paris telles qu'elles se sont déployées depuis le début du chantier de reconstruction. En s'appuyant sur les données recueillies dans le cadre de l'ANR Sacrade, dont l'objectif est de saisir les transformations physiques et symboliques des matériaux utilisés pour Notre Dame, il s'agit d'analyser ici la manière dont le bois circule et se transforme de la forêt à la charpente.

Au-delà d'une simple ethnographie des techniques et des savoir-faire, la démarche implique de saisir comment l'exceptionnalité du chantier intervient dans son approvisionnement en bois et amène à reconsidérer autrement ce matériau. La réalisation du chantier est en effet tributaire d'une double injonction qui a des incidences sur sa transformation à toutes les étapes du processus, du choix des arbres à l'installation des assemblages dans l'édifice. La première concerne sa temporalité, conditionnée par la réouverture de la cathédrale programmée en décembre 2024, la seconde concerne le choix de rebâtir « à l'identique » retenue par l'architecte en chef Philippe Villeneuve. Ces deux contraintes ont conduit tous les acteurs à procéder à des adaptations. La reconstruction « à l'identique », qui impose la forme des bois et leur essence, s'est ainsi déroulée dans un contexte qui n'a lui rien d'identique aux modalités de construction antérieures. De plus, les process de fabrication des charpentes contemporaines, industriels et normés, ont amplement transformé les connaissances en charpenterie de l'ensemble des acteurs impliqués dans cette chaîne opératoire. L'échéancier imposé les a également conduit à composer avec l'identique pour mener à bien leur travail. A cela se greffe des enjeux de communication autour la restauration et de son contrôle par l'établissement public au nom de la puissance de l'état et de l'image d'un consensus fédérateur pour reconstruire ce monument. Enfin, participer à un chantier d'exception revient aussi pour bon nombre d'acteurs à pouvoir mettre en avant le prestige de leur propre contribution, prise en étau entre tradition et innovation. L'exceptionnalité du chantier conduit donc à repenser les manières de faire habituelles. Dès lors, ses acteurs doivent composer avec des exigences parfois contradictoires et qui les amènent à repenser l'origine des matériaux utilisés pour les rendre conforme aux attentes officielles, ceci au prix d'une relecture de l'histoire, du probable et de l'incertain. Propriétaires de forêts, bucherons, débardeurs, scieurs, charpentier et scientifiques en déroulent la chaîne à toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement, réinventant les traditions dans lesquelles ils s'inscrivent.

1 - UMR 9022,
Héritages/CNRS/Paris-
Cergy université.

Métrologie de la réplique d'une travée de la charpente de Notre Dame de Paris.

Auteur.es de la présentation :

J.-L. COUREAU¹, L. KAUFFMANN¹, A. COINTE¹, P. GALIMARD¹, E. MAURIN²

Affiliation des auteur.es

1 - I2M/Université de Bordeaux/Talence

2 - LRMH/Ministère de la Culture/Champ sur Marne.

RÉSUMÉ :

Suite à l'incendie de 2019, une réplique d'une travée de la charpente de Notre Dame de Paris a été réalisée en 2020 au lycée des métiers du bâtiment de Felletin (Nouvelle Aquitaine). Cette structure, abritant à l'origine une portion de la nef, a été édifiée à partir des relevés de Fromont et Trentesaux. Cette charpente de dimensions réelles a permis de réaliser des essais mécaniques qui sont comparés à des modèles numériques de prévision du comportement. L'objectif vise à mieux comprendre les hypothèses de calculs et la stratégie de caractérisation à considérer pour prédire les déplacements réels de cette charpente.

Ce travail met en évidence les mouvements d'ensemble qui sont générés par les chargements multiphysiques. La durée de charge et les comportements locaux des assemblages en sont la source, et le séchage du bois amplifie de façon significative leurs effets. Le suivi de marqueurs et le monitoring de la structure amènent à quantifier les phénomènes de retrait des composants structuraux. Ces derniers doivent être implémentés dans la modélisation numérique. Concrètement, les retraits longitudinaux des poutres accentuent les flèches dues aux charges gravitaires. Ainsi par l'utilisation des objets numériques développés, des redistributions de chargement peuvent être étudiées dans les zones d'assemblages. De ce constat, le comportement local des assemblages traditionnels contribue à assouplir la structure par rapport aux rigidités des poutres mises en place. Les diminutions de raideur sont dépendantes de la typologie des liaisons et l'ingénierie de structure doit tenir compte de ces différentes déclinaisons. La réalisation d'essais de chargement sur la réplique permet de mieux caractériser la gamme de raideurs d'assemblages de type mi-bois et tenon mortaise. La prédiction du comportement est affranchie de l'effet d'échelle. Le monitoring sur le long-terme met en évidence des déplacements importants qui peuvent correspondre à plus de 20 fois les déplacements prédits par une modélisation simple considérant la structure parfaitement articulée et élastique.

Des essais menés en laboratoire sont développés pour mieux connaître les sources des variabilités d'un type d'assemblage, et l'étude propose d'en faire un ordonnancement selon la qualité des bois, le séchage et la mise en œuvre. Ce travail vise à mieux définir les dispositions à considérer pour mieux modéliser ce type de structure ancienne. Dans le cas où les informations sont manquantes ou peu fiables, des méthodologies d'estimation des performances utiles sont proposées sur la base du couplage entre les essais en laboratoire ou *in-situ* et les modélisations par éléments finis.

Comportement mécanique des voûtes sexpartites de Notre-Dame

Auteurs de la présentation :

TAFOREL P.¹, DUBOIS F.², MORENON P.³, NOUGAYREDE P.⁴, GROS A.⁵, MOREL S.⁶, PARENT T.^{6*}

RÉSUMÉ :

Dans le cadre de l'évaluation structurale post-incendie des voûtes de Notre-Dame réalisée par le groupe de travail « Structures », l'évaluation de l'état mécanique initial (i.e., avant incendie) des ensembles voûtes-contrebutements de la cathédrale a constitué une étape indispensable permettant de définir l'état mécanique de référence de ces ensembles mais également de comprendre finement les interactions entre une voûte et ses appuis que ces derniers soient dotés ou non d'arcs-boutants. Dans ce but, les voûtes sont donc séparées de leurs appuis au-dessus des zones de remplissage des reins de voûtes. Une voûte se trouve alors restreinte à sa partie visible depuis les combles tandis qu'un appui se voit constitué du mur gouttereau, de l'arc-boutant le cas échéant, et du volume inférieur de la voûte, associé à la zone de remplissage des reins nommé ici *tas de charge*. Sur cette base, le comportement mécanique d'un appui sans arc-boutant comme celui des piles faibles des voûtes du transept est étudié. L'estimation du comportement *poussée — déplacement horizontal* associé au niveau de l'interface voûte/appui montre une poussée initiale (i.e., à déplacement nul) dont l'origine est liée au fait que le centre de masse du *tas de charge* est localisé en porte à faux de la face interne du mur gouttereau (entraînant un couple par rapport à la base de l'appui et en conséquence une poussée au niveau de l'interface voûte/appui). Lorsque ce type d'appui est associé à un arc-boutant comme les appuis piles fortes et faibles de la nef et du chœur, on constate que la poussée initiale en pile forte est supérieure à celle constatée en pile faible alors que les poussées en tête des volées d'arcs-boutants sont quasi équivalentes. Le différentiel de poussée initiale entre piles fortes et piles faibles est donc majoritairement lié aux différences de volume/poids des *tas de charge* entre piles fortes et faibles. Par ailleurs, il est montré que l'intérêt majeur d'un appui avec arc-boutant réside dans sa capacité à redistribuer les efforts horizontaux du mur gouttereau vers la culée de l'arc-boutant offrant ainsi la possibilité d'affiner le mur gouttereau et/ou d'y ouvrir de larges baies.

Sur cette base, les états d'équilibre initiaux des ensembles voûtes-contrebutements sont étudiés. Si les ensembles du transept et de la nef montrent des positions d'équilibre analogues correspondant à des déplacements des interfaces voûtes/appuis dirigés vers l'extérieur du vaisseau (voûtes en poussée passive vs appuis en poussée active), les ensembles du chœur conduisent quant à eux à des déplacements dirigés vers l'intérieur du vaisseau central. Cette position à l'équilibre inhabituelle des voûtes du chœur trouve sa source dans la finesse peu commune des voûtains du chœur (12 à 15 cm) comparés à ceux de la nef et du transept (19 à 24 cm) conduisant à des poussées initiales des voûtes du chœur, inférieures à celles de leurs appuis et obligeant ainsi les voûtes à travailler en poussée active.

Affiliation des auteur.es

- 1 - MiMeTICS engineering/Montpellier
- 2 - LMGC (UMR 5508 CNRS)/Université de Montpellier/Montpellier
- 3 - LMDC/Université de Toulouse - INSA/Toulouse
- 4 - GSA/ENSA Paris Malaquais/Paris
- 5 - MAP (UMR-CNRS/MC 3495)/CNRS/Marseille
- 6 - I2M (UMR 5295 CNRS)/Université de Bordeaux/Bordeaux

Construire une voûte à l'époque médiévale et aujourd'hui.

Auteur.es de la présentation :

MOULIS C.¹, MECHLING J.-M.², PRUNET P.³

Affiliation des auteur.es

1 - Université de Lorraine/UR 1132 SAMA/Nancy

2 - Université de Lorraine/Institut Jean Lamour, UMR CNRS n°7198/Nancy

3 - Agence Prunet architecture et urbanisme

RÉSUMÉ :

La voûte en pierre est un organe architectural qui se généralise dans les édifices religieux dans la seconde moitié du XII^e siècle. Les cathédrales deviennent alors des laboratoires où sont expérimentés des procédés innovants répondant au défi des dimensions colossales des premiers édifices gothiques. Monter une voûte à 32 m de hauteur c'est défier la gravité, contrôler les répartitions de charges et assurer l'acheminement des matériaux à leur place définitive.

À Notre-Dame, la voûte sexpartite apparaît comme la meilleure solution au regard des considérations techniques applicables à cette époque. Elle assure une portée qui doit atteindre les 13 m et permettre le maintien de voûtains de dimensions raisonnables, tout en répartissant les charges sur 6 piliers.

L'opportunité offerte de pouvoir accéder aux claveaux de l'arc doubleau effondré de la nef a permis la lecture de l'ensemble des faces de ces blocs, tout en accédant à des échantillons exploitables de mortier. Par leur géométrie, les traces d'outils, les traits préparatoires, les signes de montage, il est possible de retracer la chaîne opératoire inhérente à la mise en œuvre des claveaux comme de la voûte. Les encoches répertoriées sur les nervures de la nef, assemblées au préalable, identifient un système de cintrage en bois relativement léger, tout comme le sont au final ces voûtes bien moins épaisses qu'imaginé. Les liants assurant la cohésion de l'ensemble des pierres de la voûte doivent être solides et suffisamment élastiques pour encaisser les mouvements du bâtiment. Si la pierre est l'ossature des voûtes, le mortier en est le cartilage, en transmettant les efforts sans effet de poinçonnement. Les caractéristiques des sables (granulométrie, nature géologique, etc.) et des liants (composition chimique) employés à leur confection ont pu être retrouvées. Des mesures physiques (densité, distribution, volume des pores, etc.) associées à des analyses d'images (lames minces pétrographiques ; tomographie des rayons X) ont par ailleurs permis de retrouver les volumes respectifs des constituants des mélanges. Des mortiers expérimentaux, proches des originaux de la cathédrale, ont été réalisés, révélant des informations sur les propriétés fraîches et durcies de ces mélanges.

Tous ces éléments témoignent de la qualité de la réalisation de ces voûtes médiévales, entre empirisme et concepts maîtrisés. Œuvrer à la restauration de ces voûtes au XXI^e siècle est d'abord une gageure tant certains savoir-faire semblent aujourd'hui perdus. La priorité était de stabiliser l'édifice en rétablissant son équilibre structurel, notamment les poussées altérées par la destruction d'une partie des voûtes lors de l'incendie. Il fallait ensuite se réapproprier la conception géométrique, les techniques de construction et les mises en œuvre traditionnelles, pour les intégrer dans le processus de restauration du monument en respectant son intégrité patrimoniale.

Les pierres pour la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris : caractérisation et étude de l'interface pierre-mortier

Auteur.es de la présentation :

BECK, K.¹, BRUNETAUD, X.¹

**Affiliation
des auteur.es**

27

¹ - Université d'Orléans,
Laboratoire de mécanique
Gabriel Lamé, Orléans

RÉSUMÉ :

L'équipe du LaMé s'est intéressé à caractériser les pierres candidates à la restauration des voûtes de Notre-Dame de Paris dans le but d'adapter la formule d'un mortier de restauration. Suite à l'identification par le LRMH des pierres des voûtes effondrées de la cathédrale, c'est la roche Croix-Huyart venant des carrières « Les pierres de Paris — Saint-Pierre-Aigle » qui a été sélectionnée. Cette roche possède deux faciès : la roche dure, noté H4, et la roche semi-dure, noté H5.

Une caractérisation physique et hydro-mécanique complète de ces deux faciès de la roche Croix-Huyart a été menée en vue de les comparer avec la pierre provenant du claveau effondré, noté N320. Les résultats montrent que, bien que l'apparence visuelle de la roche semi-dure H5 paraisse la plus proche du prélèvement venant de Notre-Dame, ce sont les propriétés hydriques et hydro-mécaniques de la roche dure H4 qui sont davantage similaires avec celles de la pierre de la cathédrale. Cela confirme le bien-fondé de la décision de la maîtrise d'œuvre qui a choisi la roche dure H4 pour la reconstruction des voûtes en 2023. Une étude de formulation de mortiers a été réalisée pour choisir le liant le plus compatible avec la pierre dure H4 de la roche Croix Huyart. Quatre types de liant balayant les différents degrés d'hydraulicité ont été testés : une chaux aérienne CL90 de Saint-Astier, une chaux naturelle hydraulique NHL3,5 de Saint-Astier, une chaux grise préformulée PF70 de Balthazard et un ciment CEM I 52,5 N de Vicat. Les résultats des tests mécaniques ont confirmé que la résistance est d'autant plus forte que le liant possède une forte hydraulicité. Mais cela signifie également que la résistance à la compression du mortier à base de ciment dépasse largement celle de la pierre, ce qui est couramment admis comme néfaste pour une maçonnerie en pierre calcaire, où le mortier doit présenter une certaine souplesse. En contrepartie, la montée en résistance est très lente pour les mortiers à base de chaux aérienne et hydraulique.

La mesure de l'adhérence a été réalisée en traction directe, d'après la norme NF EN 1015-12, après une maturation de 18 mois, afin de s'assurer que même les mortiers dont la montée en résistance est la plus faible ont pu atteindre une résistance représentative d'un état permanent. Les résultats montrent que le mortier à base de ciment possède une adhérence supérieure à 1 MPa. Cette valeur est trop proche de la résistance en traction de la pierre, et les essais présentent en partie des ruptures cohésives de la pierre, ce qui doit être évité. Les mortiers à la chaux (aérienne et hydraulique) présentent les meilleurs résultats grâce à des adhérences faibles mais non nulles, avec des valeurs proches de 0,2 MPa. Les mesures quantitatives de ces paramètres pourront aider les chercheurs du GT Structures dans leur travail de modélisation du comportement mécanique des voûtes reconstruites.

Les archives de la cathédrale à l'épreuve de l'intelligence artificielle

Auteur.es de la présentation :JOLIVET V.¹, TORRES AGUILAR S.²**Affiliation
des auteur.es**1 - École nationale des
chartes-PSL, CJM, Paris.2 - Université du
Luxembourg.

28

RÉSUMÉ :

Les 26 registres médiévaux (1326-1504) du chapitre de Notre-Dame représentent une masse documentaire d'environ 15 000 pages manuscrites très denses. Les variations graphiques et linguistiques, ainsi que la singularité de ces documents de la pratique sont autant de défis pour l'édition d'un corpus largement inédit. Le projet e-NDP, soutenu par l'ANR, a mobilisé les méthodes et outils de l'apprentissage automatique (machine learning) pour relever ces défis : lecture automatique des écritures manuscrites (HTR) pour la transcription, et modèles de langue pour son annotation linguistique (lemmatisation et liage des entités nommées). L'ouverture de ce corpus annoté, disponible pour les analyses computationnelles, participe au renouvellement de la connaissance sur l'administration de la cathédrale par les chanoines, sur la gestion de leurs droits et de leur patrimoine, et sur la société du cloître. Nous présenterons la chaîne des traitements qui a permis d'aboutir à cette édition enrichie automatisée.

À chaque étape de cette chaîne de traitements, des données sont produites et réutilisées. Une édition devient une véritable somme de jeux de données : images, vérité terrain, modèles, texte prédit, texte annoté, index. À des fins de recherche, ces données doivent toutes être décrites et accessibles, pour permettre notamment la validation des résultats. L'enjeu est aussi patrimonial, parce que certaines étapes seront rejouées lorsque des modèles de lecture ou d'annotation plus performants seront disponibles : les images numérisées ont sans aucun doute plus de valeur que la couche texte que nous sommes aujourd'hui capables de produire, et dont la qualité sera bientôt surpassée. L'application de consultation des registres développées tient compte de ce double enjeu de recherche et de patrimoine. Elle s'adosse à une infrastructure nationale pour le partage et l'archivage, et orchestre la circulation entre les différentes ressources grâce à son architecture microservices. L'accès à toutes les données produites s'en trouve garanti et favorise leur réutilisation. C'est une véritable archive numérique du patrimoine écrit de la cathédrale qui est ainsi constituée, accessible en lecture et ouverte pour la recherche.

Anastylose numérique de l'arc effondré de la nef

Auteur.es de la présentation :

E. BAILLIEUL³, A. GUILLEM^{1,2}

Affiliation des auteur.es

29

RÉSUMÉ :

Alors que les groupes de travail thématiques produisent et maîtrisent des données au périmètre bien défini, le groupe de travail Données Numériques présente la particularité de pouvoir interagir avec tous les chercheurs du chantier scientifique et de prolonger certaines problématiques disciplinaires dans une dimension numérique. Cette communication se concentre sur un travail de collaboration particulier, engageant le GT Données Numériques, le GT Pierre et le LRMH autour de l'arc doubleau F29-30 de la nef qui a été détruit lors de l'incendie de la charpente de la cathédrale. Les questions de recherche développées dans le cadre de cette collaboration montrent que la démarche pluridisciplinaire soutenue par le numérique apporte une véritable plus-value scientifique. La présentation de ce travail, centré autour d'un même objet de connaissance, démontre comment les sciences du numériques sont bien plus qu'un soutien aux chercheurs ; elles ouvrent des perspectives riches et innovantes pour la collaboration pluridisciplinaire et la science ouverte.

L'étude de l'arc doubleau effondré, en cela, est exemplaire. A l'automne 2020, la maîtrise d'œuvre, en la personne de Pascal Prunet, a rassemblé de nombreux acteurs autour des vestiges de cet arc avec un objectif : le remonter au sol pour s'interroger sur la possibilité d'une remise en œuvre des blocs à leur place initiale. Le tri des vestiges qui a permis de reconnaître et d'extraire une collection de 77 claveaux et la bonne connaissance de la géométrie de l'arc avant incendie autorisaient une telle démarche. Les premières séances de travail ont rapidement amené les ACMH à écarter l'idée d'un réemploi des blocs tombés au sol. Dans le même temps, nombre de questions de recherche sur la restitution de l'arc ont émergé, faisant passer cette opération du champ de la recherche appliquée à la restauration à celui de la recherche fondamentale. Le besoin initial de documentation est très vite devenu un travail collaboratif de connaissance globale de cette structure maçonnée, allant au-delà des besoins opérationnels. Pour cela, les chercheurs du GT Numérique ont formalisé et synthétisé une masse importante de données hétérogènes. Il a notamment été nécessaire de transcrire et d'adapter à l'écosystème numérique toute la démarche itérative de compréhension archéologique et technologique des claveaux, de l'arc et de la voûte. Sur ce point, les doubles compétences des chercheurs du GT Numérique ont été cruciales, permettant de faciliter d'acculturation numérique (vocabulaire, formation aux outils, etc.) des différents acteurs, et d'entrer de plain-pied dans le travail pluridisciplinaire.

La présentation de ce cas d'étude permet de retracer le cheminement de la co-construction scientifique des données depuis le terrain et jusque dans l'écosystème numérique. La vie numérique des vestiges a en effet commencé dès le déblaiement de la nef. La numérisation et la modélisation des données issues des fiches établies par le GT Pierre et par le LRMH a ensuite marqué le début de la production de données archéologiques. Après la décontamination des claveaux, leur numérisation par photogrammétrie a donné le coup d'envoi des hypothèses d'anastylose virtuelle, prenant le relais du remontage à blanc, et permettant de se soustraire, pour la suite des opérations, à la logistique contrainte du chantier. L'objectif de cette communication est de faire la démonstration d'une synergie de réflexion autour d'un objet archéologique, donner un exemple de co-construction de savoirs qui dépasse les compétences individuelles et disciplinaires.

1 - UPR 2002 MAP - Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine, CNRS, Marseille

2 - Ludwig Maximilian University of Munich, Geschwister-Scholl-Platz 1, 80539 München, Germany

3 - Univ. Lille, CNRS, UMR 8529 - IRHiS - Institut de Recherches Historiques du Septentrion, F-59000 Lille, France

Modélisation mécanique des maçonneries pour le diagnostic post-incendie : approches bloc à bloc, continue et hybride.

Auteur.es de la présentation :

PARENT, T.¹, TAFOREL, P.², COLAS, A.-S.³, DOMEDE, N.⁴, DUBOIS, F.⁵,
GARNIER, D.⁶, MINDEGUIA, J.-C.¹, MOREL, S.¹, MORENON, P.⁴, NOUGAYREDE, P.⁷

Affiliation des auteur.es

1 - Université de Bordeaux,
UMR5295, Bordeaux,
France

2 - MiMeTICS engineering,
Montpellier, France

3 - GERS-RRO, Université
Gustave Eiffel, Université
de Lyon, Lyon, France

4 - LMDC, Université de
Toulouse, UPS, INSA,
Toulouse, France

5 - LMGC, Univ
Montpellier, CNRS,
Montpellier, France

6 - Navier, École des
Ponts ParisTech, Université
Gustave Eiffel, CNRS,
Marne-la-Vallée, France,

7 - GSA, École Nationale
Supérieure d'Architecture
Paris Malaquais, Université
PSL, Paris, France

RÉSUMÉ :

L'incendie du 15 avril 2019 de la cathédrale Notre-Dame de Paris a montré la nécessité de disposer d'outils de modélisation avancés pour appréhender aussi finement que possible le comportement mécanique des ouvrages en maçonnerie. L'enjeu de la modélisation est d'établir un diagnostic structural de ces structures suffisamment fiable pour contribuer aux prises de décisions autour des questions de réhabilitation des ouvrages (identification de pathologies, tests de solutions de confortement). La cathédrale Notre-Dame est principalement constituée de maçonneries de pierres calcaires appareillées par des joints de mortier de chaux. Cet assemblage fortement anisotrope et hétérogène, présente un comportement mécanique non-linéaire, c'est-à-dire avec apparition possible de réarrangements irréversibles, qui ne peut être décrit correctement par les outils numériques courants utilisés par les ingénieurs de bureaux d'études. Cependant, des modèles numériques développés par les chercheurs spécifiquement pour le calcul des structures en pierre sont décrits dans la littérature scientifique. Certains parviennent à considérer la maçonnerie comme un matériau continu homogène (approche « continue »), d'autres la modélisent comme un ensemble divisé de blocs interagissant entre eux par des lois de contact (approche « bloc à bloc »). Si toutes ces approches donnent des éclairages pertinents sur le comportement des structures en pierres hourdées, aucune d'entre elles ne parvient totalement à modéliser l'ensemble des phénomènes mécaniques observés. Dans le travail présenté ici, trois modélisations différentes sont proposées (une approche continue et deux approches bloc à bloc) dont les apports innovants contribuent à fiabiliser le diagnostic structural. La comparaison méthodique des résultats de calcul permet d'améliorer à la fois les modèles en question et nos connaissances sur l'équilibre mécanique de la cathédrale. Les trois simulations ont été réalisées en parallèle par trois équipes différentes en s'appuyant sur la même enveloppe géométrique. Elles mettent en œuvre des hypothèses de chargement identiques (feu et déplacements d'appuis) appliqués sur une travée du chœur de la cathédrale comprenant une voûte sexpartite et ses dispositifs de reprise de poussée au vide (arcs boutants et culées). Cette étude comparative fournit des résultats similaires lorsque les structures sont faiblement sollicitées (Situation en service). Des différences plus marquées apparaissent lorsque la structure est sollicitée jusqu'à l'apparition de ruptures localisées irréversibles (fissurations, endommagement, etc.). En termes de durée des calculs, cette étude traduit une forte disparité entre les approches : les temps de simulations varient d'un facteur 1 à 20 entre les méthodes continues et bloc à bloc. Afin de tirer le meilleur parti de ces approches multiples, une méthode de calcul hybride couplant les approches continue et bloc à bloc est actuellement développée dans le cadre du projet ANR DEMMEFI. L'approche hybride permettra de conserver les avantages de la discrétisation bloc à bloc dans les zones fortement contraintes tout en minimisant le temps de calcul grâce au recours à l'utilisation de l'approche homogénéisée dans les grandes zones moins sollicitées. Cette approche nouvelle permettra également d'introduire dans les blocs des lois de comportement avancées pour décrire les endommagements mécanique ou thermique des pierres et du mortier sous haute température.

Reconstitutions acoustiques et sonores virtuelles de Notre-Dame.

Auteur.es de la présentation :

KATZ, B.¹, PARDOEN M.²

Affiliation des auteur.es

1 - Institut Jean Le
Rond d'Alembert/URM
7190 / Paris

2 - Maison des
Sciences de l'Homme
de Lyon Saint-
Etienne/UAR2000/Lyon

RÉSUMÉ:

L'acoustique d'un lieu, tout comme ses ambiances sonores, forment un objet impalpable, intangible qui résulte des caractéristiques d'un bâtiment tangible, mais également d'un ensemble de caractéristiques moins palpables. D'une manière générique et pour résumer, l'acoustique d'un lieu est la sonorité de l'architecture, son caractère audible, que l'on perçoit notamment au travers la réverbération — ou plus exactement le temps de réverbération. Le paysage sonore, quant à lui, est la sensorialité qui habite ce lieu, le fait vibrer. Mais alors comment étudier l'acoustique d'un lieu ? Comment résonnait, sonnait Notre-Dame et ses alentours ?

Le programme de recherche établi pour le Chantier scientifique Notre-Dame a permis, dans un premier temps, d'évaluer l'évolution de l'acoustique depuis l'incendie. Ce nouveau modèle numérique est un outil d'aide à la prise de décision — notamment en évaluant l'impact des éléments proposés dans le processus de restauration, mais aussi celui sur la sonorité de l'orgue des chœurs, etc... En complément, il a servi de « matrice » permettant de remonter le temps et ainsi permettre l'évolution de l'acoustique de Notre-Dame au fil des siècles, notamment en repositionnant des éléments architecturaux disparus et permettre l'exécution d'œuvre dans des conditions acoustiques très similaires à celles des époques visées.

Les ambiances sonores des extérieurs de Notre-Dame ont également fait l'objet d'étude, d'analyse et de restitution. L'archéologie du paysage sonore a permis de visiter sensoriellement le chantier de construction en 1170, puis celui de la restauration sous Viollet Le Duc. En parallèle, une étude sensorielle des métiers de l'artisanat a été menée, par captation des gestes des artisans au service de Notre-Dame.

Outre la production scientifique commune à chaque groupe de travail, le GT Acoustique a mobilisé ses forces vives pour créer des outils de médiation ouvert au grand public. Ainsi, il a été l'instigateur d'une fiction-radio en binaural « A la recherche de Notre-Dame », diffusé chez Audible, a créé 3 fresques sonores de moments clés de la vie de la cathédrale et a créé un audio-guide gratuit, disponible sur Android et iOS, « Murmures du passé à Notre-Dame » qui nous plonge dans une expérience immersive de l'histoire de Notre-Dame.

Faire un « écrin » pour Notre Dame :

le projet de réaménagement des abords comme enjeu urbain et patrimonial, local et global

Auteur.es de la présentation :
LALLEMENT E.¹

**Affiliation
des auteur.es**

32

RÉSUMÉ :

Cette intervention se propose de questionner la manière de refaire du Paris avec Notre-Dame. Le projet de réaménagement des abords de Notre Dame, voté en conseil de Paris le 15 avril 2021, s'inscrit dans une double temporalité, celle du temps de la production de la ville et celle de l'urgence patrimoniale. Si les abords de la cathédrale, c'est-à-dire son parvis mais plus largement le cœur de Paris sur l'île de la Cité, les quais de la Seine avec leurs ponts et berges comme site inscrit au patrimoine mondial de l'Unesco « Paris, rives de Seine » faisaient l'objet depuis déjà 2016 d'une réflexion pour les requalifier, l'incendie de la cathédrale au printemps 2019 a remis l'enjeu urbain du site patrimonial au centre des préoccupations municipales, en faisant l'un des « grands projets urbains parisiens ».

Le périmètre de l'opération découpe ainsi un morceau de Paris particulier qui en dessine, à nouveau, son « cœur » et le redéfinit. Le projet a pour ambition de « repenser complètement l'accueil de l'édifice, ses accès depuis le parvis, la gestion des flux, la continuité avec la Seine, la végétalisation du site, les parcours à travers l'île de la Cité et les perspectives » tout en mettant au concours international un projet à dimension « humble », au budget voté de 50 millions d'euros, pour redonner un « écrin » à Notre Dame.

L'enquête ethnographique menée tout au long de la concertation citoyenne pilotée par la Ville de Paris pour définir le projet et en désigner le lauréat permet de documenter ce « moment de la ville ». Elle met ainsi au jour ce cas emblématique contemporain d'entrelacement de la dimension patrimoniale dans les projets urbains, de tensions entre dimension locale et attractivité mondiale. Comment aménager ces abords qui, traversés chaque année par plus de 12 millions de touristes par an, constituent aussi un lieu de vie pour les habitants du quartier certes peu nombreux (900 personnes comptabilisés en 2016), mais aussi pour les femmes et les hommes qui travaillent quotidiennement autour de Notre-Dame, dans les commerces, dans les institutions et les entreprises, dans les lieux publics, pour les Parisiens et Grands Parisiens qui traversent cet espace aussi intégré au paysage urbain qu'exceptionnel du point de vue patrimonial ? Par ailleurs, comment concevoir le réaménagement d'un tel espace, avec notamment son parvis minéral favorisant un îlot de chaleur, à l'heure de la crise écologique ? Dans quelle mesure le réaménagement de ces abords constitue un enjeu politique particulier entre État et ville dans un contexte de crises et tensions entre acteurs aux objectifs parfois divergents ?

Ainsi, de cet « écrin » se dégagent nombre de logiques urbaines contemporaines.

1 - Université Paris
8, Institut d'études
européennes/UMR
LAVUE

Notre-Dame et les autres : la conquête de la hauteur dans l'architecture gothique

Auteur.es de la présentation :
GALLET Y.¹, CAMERLYNCK C.²

**Affiliation
des auteur.es**

33

RÉSUMÉ :

L'environnement d'une cathédrale, c'est aussi son environnement artistique, c'est-à-dire l'art de son temps. Dans ce contexte, Notre-Dame de Paris occupe une place singulière. Parmi les principales réalisations du « premier art gothique », elle occupe la dernière place chronologique, après la cathédrale de Sens et l'abbatiale de Saint-Denis, l'abbatiale de Saint-Germain-des-Prés, ou les cathédrales de Noyon, Senlis et Laon. En revanche, elle joue un rôle de tout premier plan dans un processus qui a structuré une large part de l'histoire de l'architecture gothique jusqu'en plein XIII^e siècle : la conquête de la hauteur. En effet, l'architecte de Notre-Dame de Paris a réussi, le premier, la prouesse de hisser les voûtes de la cathédrale à 32 m de hauteur, là où les édifices de son temps ne dépassaient guère les 20-24 m. De ce point de vue, Notre-Dame de Paris ouvre un chapitre essentiel de l'architecture gothique, celui des cathédrales géantes du XIII^e siècle : Chartres, Bourges, Reims, Amiens, Beauvais ou Cologne. Il importait donc de scruter avec attention ces voûtes, pour tenter de comprendre leur construction. L'incendie du 15 avril 2019 et les effondrements de voûtes qui en ont résulté ont mis en pleine lumière un paramètre qui n'avait pas été pris en compte jusqu'à présent : la minceur extrême de ces voûtes (12 cm au plus fin), tendues comme un voile de pierre ou une peau de tambour sur l'espace du haut-vaisseau. Il restait au Groupe de travail Pierre à mettre ces données inédites en perspective avec l'épaisseur des voûtes des autres cathédrales gothiques, celles qui avaient précédé Notre-Dame, comme celles qui l'avaient suivie. Pour cette enquête, une méthodologie inédite et non-invasive, combinant géoradar et modèle numérique, a été mise en œuvre afin de mesurer l'épaisseur des voûtes d'autres églises de référence, où, les voûtes étant en place, la mesure directe était impossible. La communication présentera les modalités de cette enquête, les monuments déjà investigués, et les premiers résultats qui en sont issus.

1 - Université Bordeaux
Montaigne/UMR 5607
Ausonius/Bordeaux

2 - Sorbonne
Université/UMR 7619
METIS/Paris

Si le bois m'était conté...

Climat, défrichement, sylviculture au Moyen Âge.

Auteurs.es de la présentation :

DAUX V.¹, DUPOUEY J.-L.², GARNIER E.³, AOUSTIN A.⁴, DU BOISGUEHENEUC D.¹, CLAUSTRE J.⁵, COUBRAY S.⁶, DURAND A.⁴, DUBUISSON G.⁴, GIRARD CLOS O.³, PENAGOS C.³, BROSSIER B.⁷, LEFEBVRE-DU-PREY S.⁸, LEROYER C.⁴, DUFRAISSE A.⁶

RÉSUMÉ :

Quel était le contexte forestier dans le Bassin parisien à l'époque de la construction de Notre-Dame de Paris (NDP) ? Dans quelles conditions ont poussé les arbres de la charpente médiévale ? Nous mobilisons des enregistrements palynologiques (pollens), anthracologiques (charbons de bois), dendrochronologiques (cernes des arbres) et des sources écrites pour apporter des éléments de réponse à ces questions.

Selon les sources historiques, il est admis que les XII^e-XIII^e siècles correspondent à une période de grands défrichements engendrant un recul drastique des boisements dans le Bassin parisien.

Les actes du chapitre cathédral de NDP sont peu prolixes sur la forêt et en donnent une image remarquablement uniforme. Elle n'y est jamais décrite en termes de morphologie ou de structure mais les actes font état de cultures temporaires sous couvert forestier.

En revanche, les données polliniques, au travers de l'étude d'une cinquantaine de séquences, livrent une information différente : aucune ouverture systématique du milieu n'est perçue et le paysage apparaît très inégalement boisé durant la période. Une dynamique de reconquête forestière à partir du XII^e siècle est même parfois enregistrée avec le chêne privilégié. Les analyses de charbons de bois archéologiques ont fait l'objet d'une synthèse régionale, basée sur 55 sites. Au cours de la première phase du Moyen Âge, à partir du VIII^e siècle, la consommation de bois est dominée par le chêne et le hêtre. Dans la seconde partie, à partir du XII^e, celle du hêtre diminue considérablement alors que celle du chêne reste relativement constante. En parallèle, l'exploitation du charme et celle du saule progressent. Ces observations suggèrent une gestion mieux contrôlée des boisements, combinant défrichement, plantation et gestion d'arbres à des fins utilitaires.

L'analyse des isotopes de l'oxygène dans les bois de NDP vise à reconstruire les températures estivales en France septentrionale. Les arbres exploités pour la charpente ont poussé pendant la période dite de « l'Anomalie Climatique Médiévale » (~900-1350), considérée comme chaude. Un échantillon de 34 bois (NDP, mais aussi cathédrale de Reims, abbayes de Preuilly et de Bonport) montre que la température sur la période estivale entre 1046 et 1240 est inférieure à celle de la période actuelle. La résolution annuelle des reconstructions met en évidence des événements de sécheresse documentés historiquement (1078, 1137 et 1188) mais également des événements inédits.

Concernant la largeur des cernes, les arbres de NDP montrent une croissance à la fois banale et originale. Banale car chaque arbre de la charpente trouve son homologue dans la forêt d'aujourd'hui. Originale car, en moyenne, ces arbres avaient une croissance plus rapide dans le jeune âge et plus lente dans les stades âgés. Les causes sylvicoles et environnementales de ce phénomène sont discutées. On détecte notamment une perturbation à large échelle, jusqu'ici peu connue, des peuplements forestiers.

Affiliation des auteur.es

1 - LSCE/Université de Versailles-Saint-Quentin/Gif-sur-Yvette.

2 - SILVA/INRAE/Nancy.

3 - Chrono-environnement/CNRS/Besançon.

4 - CReAAH/CNRS/Ministère de la Culture/Le Mans Université/Rennes & Le Mans.

5 - ICT/Paris-Cité/Paris.

6 - AASPE/CNRS/Inrap/Paris.

7 - ISEM/CNRS/Montpellier.

8 - LaMOP/Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne/Paris.

L'histoire sociale de Notre-Dame au miroir de ses archives

Auteur.es de la présentation :

CLAUSTRE J.¹, LUSSET E.²

Affiliation des auteur.es

1 - Université Paris
Cité/ICT/Paris.

2 - CNRS/LaMOP-UMR
8589/Paris

RÉSUMÉ :

Le projet ANR e-NDP *Notre-Dame de Paris et son cloître* (2021-2024) étudie la documentation textuelle de la cathédrale (livres et archives manuscrites). Rédigés entre le XIV^e et le XVIII^e siècle par les 51 chanoines en charge du Trésor et de la liturgie dans la cathédrale, les registres capitulaires sont une source essentielle pour connaître l'histoire sociale de Notre-Dame et, plus largement, celle de Paris au Moyen Âge. 26 registres ont été conservés pour la période médiévale, soit plus de 14 600 pages de texte manuscrit latin. Afin d'exploiter de manière exhaustive cette documentation massive et hétéroclite, les ressources de l'intelligence artificielle ont été utilisées pour transcrire intégralement les registres et exploiter leur contenu, notamment grâce à une base de données de personnes. Au-delà des 800 chanoines de Notre-Dame entre 1326 et 1504, dont on peut désormais reconstituer la carrière, les registres permettent de mieux connaître l'histoire des hommes et des femmes qui vivent et travaillent dans le quartier de la cathédrale (des officiers du chapitre aux invités de marque qui logent chez les chanoines, en passant par les servantes au service des clercs). Coordonné par Julie Claustre (ICT, Paris Cité), le projet e-NDP réunit un consortium de chercheurs et de chercheuses de l'École nationale des chartes, de la Bibliothèque nationale de France, de la Bibliothèque Mazarine, des Archives nationales et du Laboratoire de médiévistique occidentale de Paris (Université Paris 1-CNRS).

Les chapiteaux sculptés, témoins de l'organisation du chantier

Auteur.es de la présentation :
HAYOT D.¹

**Affiliation
des auteur.es**

36

¹ - Centre André Chastel,
UMR 8150

RÉSUMÉ :

Plus d'un millier de chapiteaux composent l'essentiel du décor monumental plastique de l'intérieur de Notre-Dame, qui constitue sur ce point un ensemble particulièrement ambitieux. Profitant de la présence généralisée d'échafaudages, le groupe thématique « Décor monumental » utilise les technologies numériques (lasergrammétrie et photogrammétrie) pour effectuer le relevé des éléments sculptés, et particulièrement celui des chapiteaux. Ensemble extraordinaire par le nombre comme par la qualité, ces chapiteaux sont caractérisés par une remarquable diversité de styles, qui s'explique en partie — mais en partie seulement — par la durée du chantier, ou plutôt des chantiers successifs de Notre-Dame : en cela, les chapiteaux de la cathédrale fournissent un résumé saisissant de l'évolution du décor sculpté en France entre le milieu du XII^e et le milieu du XIV^e siècle. Mais au-delà de ces considérations artistiques, ces chapiteaux peuvent nourrir la réflexion des chercheurs autour de l'organisation du chantier et son mode de progression au sein de la cathédrale. Dans le cadre de cette intervention, on s'intéressera en particulier aux chapiteaux du chœur, qui forment un ensemble remarquable par leur qualité comme par leur diversité et s'avèrent révélateurs de multiples aspects liés à la construction de la cathédrale : mode de progression du chantier, répartition du travail entre les équipes de sculpteurs, degré de liberté laissé aux artistes, impact de l'organisation même du chantier dans les changements de parti artistiques... A travers ces chapiteaux exceptionnels, c'est aussi la dimension humaine d'un grand chantier médiéval qui transparaît.

Les orgues et la géographie sonore de Notre-Dame de Paris 1403-2023

Auteur.es de la présentation :

D'ALESSANDRO C.¹, BALTAZAR M.²

Affiliation
des auteur.es

37

RÉSUMÉ :

Le chantier de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris nous a permis de situer le premier grand orgue construit dans l'édifice entre 1330 et 1360, à proximité du chœur, dans la nef. Entre 1401 et 1403, un second grand orgue est installé sur la tribune ouest, à l'endroit qu'il occupe sans solution de continuité depuis. C'est la première fois, en France et dans le monde, qu'un instrument est disposé à l'entrée d'un édifice et non à proximité du chœur, donnant naissance à une géographie sonore bipolaire. Le chœur et l'entrée forment deux positions privilégiées qui organisent les nombreuses pratiques musicales statiques et ambulatoires de la cathédrale : processions, stations, entrées solennelles, messes, offices, salut et autres formes de dévotion. Cette nouvelle géographie sonore semble refléter dans la cathédrale l'organisation spatiale et politique de l'île de la Cité, le pouvoir spirituel et sacré à l'est, le pouvoir royal et profane à l'ouest. Elle manifeste au sein de la cathédrale deux fonctions spirituelles et sociales de la musique : la louange divine au chœur et le passage du monde profane au monde sacré à l'entrée. Musicalement, la bipolarisation sépare davantage les fonctions de l'orgue et celles du chœur, elle favorise les pratiques responsoriales, la substitution, l'alternance plutôt que l'accompagnement et le développement d'une musique instrumentale idiomatique. L'importance structurelle de l'orgue de chœur réapparaît à l'occasion des grandes campagnes de restauration, architecturales et religieuses du 19^e siècle. L'incendie, en épargnant l'orgue de tribune et en ruinant l'orgue de chœur interroge de nouveau la place des orgues dans la géographie sonore de Notre-Dame de Paris.

En 2019, le grand orgue de tribune a occupé une place de choix dans le traitement médiatique de la catastrophe, aux côtés des objets mobiliers et immobiliers épargnés par les flammes. Investit par l'émotion, il matérialise désormais l'attachement au monument bien au-delà des communautés qui reconnaissaient jusqu'alors son prestige. Les étapes de sa restauration ont été relayées par les médias (l'instrument ayant été contaminé par le plomb), contribuant au récit qui accompagne le chantier hors norme de la cathédrale. Il en est allé tout autrement pour l'orgue de chœur. Noyé sous les tonnes d'eau déversées pour éteindre l'incendie, l'instrument n'a guère attiré de compassion en dehors du cercle de ses usagers. Aussi, s'il a semblé évident que le chantier de restauration du grand orgue soit associé d'emblée à celui de la cathédrale, la question du sort réservé à l'orgue de chœur s'est posée plus progressivement. L'ethnographie comparée de la restauration des deux instruments montre comment les enjeux patrimoniaux et liturgiques soulevés par la restauration du monument sont ici distribués, en s'inscrivant dans une logique qui, depuis le Moyen-âge, polarise l'espace au travers des instruments.

1 - Sorbonne Université,
Institut Jean le Rond
d'Alembert/CNRS/Paris.

2 - UMR 9022,
Héritages/CNRS/Cergy-
Pontoise.

SOMMAIRE POSTERS

SESSION 2 : CHRONOLOGIE ET DATATIONS Page 40

- Datation des bois indatables par la composition isotopique de l'oxygène !.
- Des nouvelles de la calibration Notre-Dame.
- La datation radiocarbone du mobilier ferreux de Notre-Dame de Paris : une contribution originale pour la chronologie des phases d'édification et de restauration.
- Typochronologie des traces d'outils à Notre-Dame de Paris.

SESSION 3 : MATÉRIAUX ET STRUCTURES À L'ÉPREUVE DU FEU . . . Page 44

- La gestion des vitraux dans le cadre d'une catastrophe : cathédrale Notre-Dame et Cathédrale Saint-Pierre-Saint-Paul de Nantes.
- L'impact microbiologique sur les vitraux de Notre-Dame.
- La spectroscopie optique au service des vitraux de Notre-Dame.
- L'évaluation de l'état sanitaire de la charpente de Notre-Dame de Paris : pour une étude des insectes ravageurs du bois.
- Les agrafes de Notre-Dame : une lecture de l'incendie par les produits de corrosion du fer.

SESSION 4 : SAVOIR-FAIRE ET TECHNIQUES DE CHANTIER : FAIRE REVIVRE L'HISTOIRE Page 49

- Les signes lapidaires.
- La recherche sur les verres de couleur des vitraux du XIX^e siècle.

SESSION 5 : CIRCULATION / PROVENANCE / RÉSEAUX D'ACQUISITION ET D'ÉCHANGE, ORGANISATION DES CHANTIERS DE CONSTRUCTION PAGE 51

- Retrouver l'origine des bois de chênes à partir de leur composition élémentaire - apport de l'analyse μ XRF (ITRAX).
- Les mortiers de Notre-Dame.

SESSION 6 : STRUCTURE ET EXPÉRIENCES ARCHITECTURALES . . . Page 53

- Effet du vieillissement naturel sur les propriétés du bois de chêne.
- Interactions charpente-maçonnerie sur une travée du chevet de Notre-Dame : report des charges de vent et rôle des renforts métalliques (agrafes, tirants, ...).
- Étude du séchage du bois vert : analyse des mécanismes de séchage et des conséquences sur les structures.
- Caractérisation mécanique des pierres de Notre-Dame de Paris par mesure de la vitesse de propagation du son.
- Tassement de la façade ouest de Notre-Dame - Réactions du chantier médiéval.
- Évaluation structurale des voûtes de la cathédrale Notre-Dame de Paris par le calcul à la rupture.

SESSION 7 : NUMÉRIQUE Page 59

- Le rôle transversal du groupe de travail “données numériques” : l'écosystème Notre-Dame pour l'analyse et la mémorisation du chantier scientifique.
- Une plateforme logicielle pour centraliser, enrichir et spatialiser des données hétérogènes.
- Des objets matériels aux données numériques : enjeux de numérisation multi-échelle et multi-temporelle.
- Des données numériques aux connaissances pluridisciplinaires: enjeux de documentation et de formalisation.
- Explorer un corpus de données interconnectées au prisme des dimensions spatiales, temporelles et sémantiques.

SESSION 8 : NOTRE-DAME DANS SON ENVIRONNEMENT Page 64

- La mémoire isotopique de la forêt de Notre Dame a-t-elle résisté à l'incendie?.
- Impact de l'environnement sur le brunissement des plombs de couverture : de Notre-Dame de Paris au laboratoire.

SESSION 9 : NOTRE-DAME, UN LIEU VÉCU Page 68

- Le rayonnement de Notre-Dame : le portail de Notre-Dame de Longpont-sur-Orge. L'apport de la récente restauration .
- Modélisation de la polychromie du portail central .
- La porte rouge : analyse de la polychromie .
- L'acoustique de Notre-Dame : hier et aujourd'hui.
- Écouter Notre-Dame à travers les siècles.
- Etudes autour des paysages sonores : à la Recherche de Notre-Dame, et Notre-Dame Whispers.

Datation des bois indatables par la composition isotopique de l'oxygène

Auteur.es de la présentation :

DU BOISGUEHENEUC D.^{1,2}, DAUX V.^{1,3}, PIERRE M.¹, COMBACAL T., SÉQUARD P., LE DIGOL Y.⁴, GIRARDCLOS O.⁵, DUFRAISSE A.².

RÉSUMÉ :

La datation dendrochronologique conventionnelle d'un bois repose sur la détermination de sa séquence de largeurs de cernes et sur la comparaison statistique de cette séquence à une série de référence. Certains bois, dont la séquences est trop courte, monotone ou perturbée, sont indatables par cette méthode. Une procédure, récemment développée au Royaume-Uni, basée sur la mesure des rapports isotopiques stables ($\delta^{18}\text{O}$), a démontré son potentiel pour dater des bois indatables par l'approche conventionnelle (Loader et al., 2019). La technique est basée sur la mesure de $\delta^{18}\text{O}$ dans le bois des cernes successifs et la comparaison objective de la série obtenue avec une chronologie de $\delta^{18}\text{O}$ de référence. Le test statistique qui permet de comparer la chronologies de $\delta^{18}\text{O}$ d'un bois à celle de référence, issue d'un site plus ou moins distant, repose sur des calculs statistiques dont la significativité est déterminée par un test de student. Deux paramètres sont à considérer : $1/p$ et un facteur d'isolement, FI, qui doivent être supérieurs ou égaux à 100 et 10 respectivement (Loader et al. 2019).

Partant de l'hypothèse d'une importante homogénéité spatiale du signal isotopique, nous avons appliqué le protocole de datation isotopique pour dater les bois médiévaux de l'abbaye de Preuilly (Seine-et-Marne ; 1163-1240) et un arbre remarquable de la forêt de Fontainebleau (Jupiter ; 1663-1989), en utilisant comme référence la chronologie isotopique du Centre de l'Angleterre (1200-2000) (Loader et al., 2019). Nous avons également évalué la possibilité de dater les bois médiévaux de l'abbaye de Bonport (1141-1200) à partir de la chronologie développée à Preuilly. Jupiter a été daté avec succès par rapport à la série anglaise (327 années communes aux deux séries ; $1/p\text{-value} = 155.10^6$, FI = 56.10^6). En revanche les seuils attendus n'ont pas été atteints pour la datation des bois de Preuilly avec cette même série de référence (41 ans en commun ; $1/p\text{-value} = <100$). Enfin, la méthode de datation isotopique a livré la date attendue pour les bois de Bonport (1141-1200) datés par rapport à Preuilly (38 ans ; $1/p\text{-value} = 1915$, FI = 115).

Ces différents tests révèlent que des bois distants les uns des autres peuvent être datés par la méthode isotopique à condition que leur période temporelle commune soit suffisamment longue, d'autant plus longue que la distance séparant leurs régions d'origine est importante. Les bois de sites relativement proches, tels que Bonport et Preuilly (175km) peuvent être datés l'un par rapport à l'autre même si leur période commune est limitée à quelques dizaines d'années.

Cette méthode est très prometteuse puisqu'elle permet de dater des bois réputés indatables. Une chronologie de référence française, dont la partie la plus ancienne est fondée sur des bois de Notre Dame de Paris, est en cours d'élaboration. L'intégration de ces derniers qui couvrent les XI^e et XII^e siècle fait de cette chronologie de référence la plus longue d'Europe Occidentale.

Affiliation des auteur.es

1 - LSCE/IPSL, UMR CEA/CNRS/UVSQ/UPSaclay 8212, L'Orme des Merisiers, Bât. 701, CEA Saclay, 91191 Gif/Yvette Cedex, France

2 - AASPE- CNRS/MNHN UMR 7209, CP56, 55 rue Buffon, 75005 Paris, France

3 - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 55 avenue de Paris, 78035 Versailles Cedex

4 - DENDROTECH, 35830 Betton

5 - Université de Bourgogne Franche-Comté, CNRS/LCE - Laboratoire Chrono-environnement (UMR 6249), 25000

Des nouvelles de la calibration Notre-Dame

Auteur.es de la présentation :

HATTÉ C.^{1,2}, BECK L.³, DU BOISGUEHEUNEC D.¹, CAFFY I.³, DAUX V.¹, DELQUE KOLIC E.³, DUMOULIN J.-P.³, DUFRAISSE A.⁴, GIRARDCLOS O.⁵, HUNOT JY.⁶, LABIDI K.^{1,7}, LEMOINE M.⁴, NGUYEN VAN A.⁸, PATERNE M.¹, PENAGOS C.⁵, PIERRE M.¹, PHOUYBANHDYT B.¹, RICHARDIN P.⁸, STULCOVA A.⁴, THIL F.¹, TISNÉRAT-LABORDE N.¹

RÉSUMÉ :

Notre-Dame de Paris a été partiellement détruite par un incendie le 15 avril 2019. Cette malheureuse destruction a miraculeusement épargné une partie de la charpente et a rendu, accessibles à la communauté scientifique, des bois de la « forêt ».

Parce qu'ils ont une mémoire annuelle de leur environnement immédiat, les bois constituent de précieuses archives pour restituer le passé. Ils sont le support de reconstitutions des fluctuations passées du climat. On le sait. Mais ce que l'on sait moins, c'est qu'ils ont aussi la mémoire d'événements extra-terrestres, comme les variations de l'activité solaire, des explosions de supernovae, les sursauts gamma. C'est cet aspect que les géochronologues du radiocarbone vont rechercher dans les chroniques des teneurs en ^{14}C atmosphériques obtenues en mesurant l'activité ^{14}C de la cellulose, extraite, cerne après cerne, des poutres non brûlées de Notre-Dame.

Ce travail analytique considérable mobilise trois laboratoires de datation ^{14}C , deux instruments de mesure rares (spectromètre de masse avec accélérateur) et des dendrochronologues. Il nécessite également un long cheminement pour atteindre les résultats. Il a fallu inventorier et dater l'ensemble des bois récupérés, identifier les bons candidats qui fourniront des chroniques longues et précises des teneurs en ^{14}C atmosphérique, homogénéiser les protocoles d'extraction de la cellulose entre les trois laboratoires de datation, valider les procédures de réduction des données brutes sur les deux équipements impliqués et enfin lancer la découpe, cerne à cerne du bois final pour des épaisseurs dépassant rarement le millimètre. Nous sommes maintenant prêts pour le partage de la charge analytique en ^{14}C (chimie et mesure physique). Viendront ensuite les temps de l'interprétation de la chronique obtenue et celui de la proposition d'intégration de nos données dans la courbe globale que nous ferons au groupe international *IntCal*, en charge d'intégrer l'avancement des connaissances dans la courbe de calibration ^{14}C qui permet de traduire en années vraies les mesures que nous menons dans nos laboratoires.

Le poster que nous proposons, reprend le contexte scientifique de notre implication dans le chantier scientifique Notre-Dame et les différentes étapes que nous avons suivies jusqu'à aujourd'hui.

Affiliation des auteur.es

1 - LSCE, UMR 8212 CEA CNRS UVSQ, Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

2 - Silesian University of Technology, 44-100 Gliwice, Pologne

3 - LMC14, LSCE, UMR 8212 CEA CNRS UVSQ, Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

4 - UMR 7209 MNHN CNRS, AASPE, 57 rue Cuvier, 75231 Paris, France

5 - Université de Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Laboratoire Chrono-environnement, 25250 Montbéliard, France

6 - CReAAH, UMR 6566, Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire

7 - IRFU, CEA, Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

8 - C2RMF, Palais du Louvre, Porte des Lions, 75001 Paris, France

La datation radiocarbone du mobilier ferreux de Notre-Dame de Paris : une contribution originale pour la chronologie des phases d'édification et de restauration.

Auteur.es de la présentation :

BERNARD M.¹, BECK L.², DELQUÉ-KOLIC E.², L'HÉRITIER M.³, AZÉMA A.⁴, DILLMANN P.¹

Affiliation des auteur.es

- 1 - LSCE, UMR 8212 1 - Université Paris-Saclay/LAPA, IRAMAT UMR7065, NIMBE UMR3685, CEA, CNRS/Gif-sur-Yvette
2 - UVSQ/LMC14, LSCE-IPSL, CEA, CNRS/Gif-sur-Yvette
3 - Université Paris 8/ArScAn UMR7041, CNRS/Saint-Denis
4 - LRMH, CRC UAR3224, MNHN/Champs-sur-Marne

RÉSUMÉ :

Les armatures en fer de la cathédrale Notre-Dame de Paris constituent une source de données pour l'interprétation de l'architecture gothique. La datation au radiocarbone de ces métaux permet de fournir des informations sur la chronologie des différentes périodes de construction de l'édifice et de révéler de potentiels exemples de recyclage sur le chantier médiéval. En outre, cette méthode, associée à des analyses archéométallurgiques, contribue à mettre en lumière le rôle joué par le fer dans la stratégie d'édification du monument.

Parmi les différents éléments de ce corpus se trouvent des agrafes en fer dans la maçonnerie au niveau des tribunes, des murs gouttereaux, des murs sous les terrasses extérieures du chœur ou encore dans des colonnes monolithiques adossées aux bas-côtés de la nef et des chapelles. S'ajoutent à cet inventaire des fers de charpente tels que des clous, des tiges boulonnées et des chevilles clavetées, mais également des crêtes de faîtage, des goujons, ou encore des tirants. M. L'Héritier et al [1] ont réalisé la datation radiocarbone de six agrafes : deux d'entre elles proviennent des tribunes et quatre des murs gouttereaux. Ces premiers résultats ont révélé que les agrafes des tribunes sont plus anciennes que celles des murs supérieurs, ce qui coïncide avec les phases de construction de la cathédrale (milieu du XII^e siècle et début du XIII^e siècle). Suivant la procédure expérimentale décrite par S. Leroy et al [2] pour les armatures en fer des cathédrales de Bourges et de Beauvais, deux anciennes barlotières provenant des baies hautes ont également été datés, ainsi que trois nouvelles agrafes des murs gouttereaux et deux goujons provenant des piles du déambulatoire du chœur.

Les récentes analyses réalisées sur ces armatures métalliques compléteront les données existantes [1] et nous permettront de préciser chronologiquement l'emploi des matériaux ferreux à Notre-Dame de Paris et de mieux appréhender les techniques de construction impliquant ces éléments en fer.

[1] M. L'Héritier, A. Azéma, D. Sylvilay, E. Delqué-Kolic, B. Lucile, I. Guillot, M. Bernard, P. Dillmann, *PLOS ONE*, 18(3) (2023).

[2] S. Leroy, M. L'Héritier, E. Delqué-Kolic, J.-P. Dumoulin, C. Moreau, P. Dillmann, *Journal of Archaeological Science*, (2014).

Typochronologie des traces d'outils à Notre-Dame de Paris

Auteur.es de la présentation :

PHALIP B.¹, NOUZERAN D.², MOULIS C.³

Affiliation des auteur.es

1 - Université Clermont-Auvergne/UPR 1001
CHEC/Clermont-Ferrand

2 - UMR 8529 IRHiS/Lille

3 - Université de Lorraine/UR 1132
SAMA/Nancy

RÉSUMÉ :

L'étude archéologique des élévations nécessite à la fois des documents de travail et de restitution des données scientifiques acquises durant le chantier de restauration. Dans le but d'exprimer une cartographie fidèle en termes de mesure comme de mise en forme graphique, trois numérisations complémentaires ont été réalisées par le GT pierre sur l'espace central de l'édifice. Une numérisation par scanner-laser afin d'obtenir des calages géométriques précis, une numérisation par photogrammétrie en lumière frontale sur les échafaudages pour en dessiner le cerné exact des joints ainsi que de la stratigraphie murale, et enfin une numérisation photogrammétrique en lumière rasante pour compléter les observations sur l'épiderme lithique (traces d'outils, signes lapidaires, marques de préparation de taille, etc.).

Sur les parements, l'étude montre que dans le chœur, la taille layée est majoritaire (marteau-taillant — lame droite), à la différence de la nef, où la taille brettelée domine (lame dentée). L'utilisation de la lame droite se fait ici en oblique, tandis que la lame dentée se verticalise rapidement. Le transept apparaît comme un lieu de transition où ces deux techniques se côtoient, montrant ainsi une évolution dans le choix des outils employés, dès les dernières décennies du XII^e siècle, phénomène qui n'est pas propre à Notre-Dame de Paris. La technologie et l'habitude des tailleurs évoluent également avec la densité de la pierre, de plus en plus dure avec l'avancée du chantier d'Est en Ouest. Si peu de différences géologiques séparent les provenances des pierres, les relevés durométriques montrent une adaptation de l'outil à la dureté de la pierre. Si l'étude des parements est une chose, il faut reconnaître qu'elle n'offre qu'une vision des outils employés lors du travail de finition des blocs : le travail préalable d'équarrissement et de dégrossissage nous échappe. Il est toutefois possible de l'approcher à travers l'étude des faces destinées à être noyées dans les maçonneries. Elles nous ont été accessibles par l'effondrement d'une partie des voûtes ou le ragréage de certaines élévations. Les outils ne diffèrent guère, mais leur emploi est différent, les coups sont plus marqués, plus lâches aussi, et plus inclinés ; ceci est particulièrement vrai pour les extradors des claveaux de l'arc doubleau effondré de la nef.

La chronologie de ces espaces est ainsi étudiée finement par les transitions particulières qu'il est possible d'observer sur les parements. La stratigraphie des appareils et la répartition des traces d'outils dévoilent les repentirs et les transformations progressives de l'édifice, depuis sa construction jusqu'à nos jours. Il a ainsi été possible de proposer un phasage des restaurations/remplacements de pierres, à partir des traces d'outils, qui très souvent se corrélaient aux hiatus observés dans les assises.

La gestion des vitraux dans le cadre d'une catastrophe : cathédrale Notre-Dame et Cathédrale Saint-Pierre-Saint-Paul de Nantes

Auteur.es de la présentation :

MONIQUE J.^{1,2,3}, TRICHEREAU B.^{2,3}, LOISEL C.^{2,3}

Affiliation des auteur.es

1 - Université Paris I
Panthéon Sorbonne/UFR
03 Histoire de l'art et
archéologie/Paris.

2 - Laboratoire de
Recherche des
Monuments Historiques,
Champs-sur-Marne.

3 - Centre de Recherche
sur La Conservation,
UAR3224, Sorbonne
Universités, Muséum
national d'Histoire
naturelle, Ministère de La
Culture, CNRS, Paris.

RÉSUMÉ :

Les incendies des cathédrales Notre-Dame de Paris et Saint-Pierre-et-Saint-Paul de Nantes, ont rappelé comment les monuments historiques et plus particulièrement les vitraux, peuvent être victimes d'événements catastrophiques.

A Paris, au lendemain de l'incendie, les vitraux historiés, ne semblaient pas avoir souffert de la chaleur mais un diagnostic plus précis était nécessaire pour statuer sur leur état de conservation. La dépose des baies hautes du chevet et de la nef de l'édifice s'intégrait dans le contexte de « l'urgence impérieuse ». Il était essentiel de libérer l'espace des baies pour faciliter la sécurisation des maçonneries. Au cours de la dépose des 25 verrières, le constat a été rassurant ; grâce à une mobilisation importante des restaurateurs de vitraux et des ateliers de peintre-verriers, l'ensemble des panneaux a pu être déposé rapidement, en seulement neuf jours¹. Cette opération a été l'occasion d'étudier et de questionner les paramètres de logistique d'accès, de méthodologie de dépose des vitraux, et de coordination des ateliers de restauration.

La mise en place d'un constat d'état normalisé sur les vitraux déposés, complétée par l'étude sanitaire de neuf panneaux confiés au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques a permis d'établir un premier bilan des pathologies présentes sur les panneaux. Par la suite, des analyses ont été réalisées pour caractériser les dépôts exogènes présents sur les faces interne et externe. Suite au diagnostic et à la caractérisation de ces dépôts, des essais de nettoyage ont été réalisés sur les panneaux afin de définir et d'optimiser les protocoles de décontamination et les traitements de nettoyage des vitraux de la cathédrale Notre-Dame de Paris.

Essentiellement mobilisées sur les opérations sur Notre-Dame, les protagonistes de la conservation ont dû faire face à une autre catastrophe, le 18 juillet 2020, celle de l'incendie de la cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul de Nantes. Le contexte était totalement différent pour les vitraux puisque la verrière occidentale, joyaux du XVI^e siècle a été entièrement détruite par l'incendie. En effet, sous le souffle de l'incendie, une déflagration s'est produite, entraînant l'explosion de la baie. Le recollement des débris de verre a été réalisé sur site, rapidement après l'incendie sur le parvis et dans le chevet grâce à la mise en place d'un carroyage. Ensuite, une opération de décontamination du plomb a été mise en place sur les milliers de fragments de verres. Au cours de cette étape, des assemblages de pièces de verres ont pu être réalisés en vue de restituer au maximum l'histoire de cette verrière. Ces retours sur expérience, riches d'enseignements, doivent être documentés et transmis pour faciliter les actions à mener sur les vitraux sinistrés².

1 - Loisel C., Trichereau B., *La dépose des vitraux dans l'urgence d'une catastrophe: les baies hautes de la cathédrale Notre-Dame de Paris*, *Monumental S2*, 2021, p. 96 — 97.

2 - Boulanger K. et al., *Stained Glass after a Disaster: Feedback and Methodology*, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 56, 2022, p. 36-47.

L'impact microbiologique sur les vitraux de Notre-Dame

Auteur.es de la présentation :

BOUTILLET C.¹, TRICHEREAU B.²⁻³, PEREZ A.¹, VERNEY-CARRON A.⁴, LOISEL C.²⁻³, ROSSANO S.¹

RÉSUMÉ :

La dépose des vitraux de Notre-Dame de Paris suite à l'incendie a été l'occasion d'effectuer des prélèvements microbiologiques en face interne et/ou externe. La campagne d'échantillonnage a eu lieu sur les vitraux de la cathédrale Notre-Dame de Paris déposés dans l'atelier de restauration d'Isabelle Baudoin à Saint-Maur-des-Fossés. Les vitraux sur lesquels ont été réalisés les prélèvements datent du XIX^e siècle et n'avaient subi aucune restauration préalable. La stratégie d'échantillonnage a été de faire des prélèvements en face interne lorsqu'elle était accessible et en face externe dans les zones présentant le moins de sable ou de croûtes noires.

Ces prélèvements ont été réalisés par frottage d'un écouvillon stérile sur une surface de 1cm par 1cm du vitrail durant 30 secondes. Chaque prélèvement a été effectué deux fois pour une même zone. Pour chaque zone, un premier écouvillon a été conservé pour une analyse de métagénomique, afin d'identifier les microorganismes recueillis.

Un deuxième écouvillon a été utilisé pour une mise en culture dans un milieu de culture enrichi contenant une poudre fine de verre synthétique de composition médiévale, afin de sélectionner les microorganismes cultivables au laboratoire et capable de croître en utilisant le substrat vitreux. Les mélanges bactériens obtenus ont ensuite été utilisés dans des expériences de bioaltération de verres silico-calco-potassiques modèles de vitraux médiévaux du XIII^e siècle, contenant des teneurs variables en manganèse et en fer, pour cibler en particulier le rôle joué par ces chromophores sur les phénomènes de colonisation bactérienne.

Un premier type d'expérience a consisté à altérer les verres en milieu humide en présence des bactéries pré-sélectionnées. Ces expériences avaient pour but de reproduire au laboratoire une altération dans des conditions proches du milieu naturel et d'observer une éventuelle sélection des souches bactériennes en fonction de la composition des verres. Cette sélection a pu être étudiée après une étape de séquençage des populations bactériennes développées sur les verres.

Un deuxième type d'expérience a consisté à altérer en milieu aqueux dynamique (*bioréacteur*) ces mêmes verres en présence des bactéries pré-sélectionnées. Ces expériences ont permis d'exacerber les phénomènes de colonisation bactérienne des verres, et de bioaltération. D'importants biofilms très fortement accrochés en surface des échantillons vitreux ont pu être observés.

Affiliation des auteur.es

1 - Université Gustave Eiffel, Laboratoire Géomatériaux et Environnement Organisme, Champs-sur-Marne. 2 - Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, Champs-sur-Marne.

3 - Centre de Recherche sur La Conservation, UAR3224, Sorbonne Universités, Muséum national d'Histoire naturelle, Ministère de La Culture, CNRS, Paris.

4 - Université Paris Est Créteil et Université Paris Cité, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, Créteil.

La spectroscopie optique au service des vitraux de Notre-Dame

Auteurs de la présentation :

BRETONNET C.^{1,2,3}, JAÏS D.^{1,2,3}, TAZZIOLI A.^{2,3,4,5,6}, CAROFF T.¹, TRICHEREAU B.^{2,3}, GALOISY L.¹, CALAS G.¹, LOISEL C.^{2,3}

Affiliation des auteurs

1 - Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, Sorbonne Université, 75005 Paris, France.

2 - Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, Champs-sur-Marne.

3 - Centre de Recherche sur La Conservation, UAR3224, Sorbonne Université, Muséum national d'Histoire naturelle, Ministère de La Culture, CNRS, Paris.

4 - Institut de Recherche de Chimie Paris, Université PSL, Paris.

5 - Lab-BC UAR3506, C2RMF, CNRS/MC/ENSCP-PSL, Paris. 6 - EDF R&D, Chatou.

RÉSUMÉ :

Suite à l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris, les baies hautes du chevet ont fait l'objet d'une restauration en atelier. Leur accès a permis de mieux étudier ces œuvres de Charles-Laurent Maréchal de Metz, peintre-verrier reconnu au XIX^e siècle¹. De nombreuses questions ont été soulevées par les historiens spécialistes du vitrail, en particulier sur la fabrication des verres. Pour avancer sur la connaissance de ces œuvres, quatre panneaux représentatifs ont été sélectionnés afin de caractériser l'origine de leur couleur. Pour cela, nous avons utilisé un dispositif portable de spectroscopie d'absorption optique, développé à l'IMPMC pour analyser la coloration des vitraux². Cet instrument mesure l'absorption de la lumière du proche infrarouge à l'ultraviolet. Il permet ainsi de déterminer les bandes d'absorption spécifiques des éléments colorants et donne accès à la spéciation de ces derniers (nature, degré d'oxydation et environnement structural). Les analyses PIXE et PIGE effectuées à New AGLAE renseignent sur la composition chimique quantitative des panneaux. Coupler ces résultats avec ceux de spectroscopie optique permet de remonter aux conditions d'élaboration choisies par les verriers pour obtenir la coloration désirée. Ces vitraux se caractérisent par une diversité des teintes bleues. Nous avons pu montrer que, si le cobalt divalent reste l'ion colorant prédominant, différentes nuances sont obtenues grâce à l'utilisation du cuivre divalent, indiquant un ajustement intentionnel de la coloration du verre, intéressant à comparer avec des verres patrimoniaux plus anciens⁴. La teinte de certains verres est ajustée par la présence de fer (Fe^{2+} , Fe^{3+}) ou de manganèse (Mn^{3+}). Il est intéressant de relier ces observations à la composition chimique de ces verres pour remonter aux conditions de fabrication des verres lors du soufflage dans la verrerie. La couleur verte peut être obtenue par application de jaune d'argent sur un verre bleu coloré en masse par le cobalt divalent, ou bien lors du soufflage, par introduction au sein du mélange de cuivre divalent ou de chrome trivalent, un élément chimique par ailleurs absent des verres du Moyen-Âge⁵. Ici aussi, la connaissance de la composition chimique de ces vitraux³ permet d'attribuer ces variations soit à une modification des conditions d'élaboration des verres soit à des variations de concentration des éléments colorants. Le regard croisé des différents experts, historiens et physico-chimistes, a permis d'avancer sur la connaissance des méthodes de fabrication de ces verres soufflés au XIX^e siècle, commandés par l'architecte Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc et créés pour s'approcher du visuel du Moyen-Âge.

1. Pillet, E. et al., *J. Cult. Herit.* 65, 123–132 (2024).

2. Hunault M. et al., *Appl Spectrosc.* 70, 778–784 (2016).

3. Analyses PIXE/PIGE sur New AGLAE réalisées par Astrid Tazzioli.

4. Hunault, M. et al., *J. Am. Ceram. Soc.*, 99, 89–97 (2016).

5. Freestone, I. C. & Bimson, M. *J. Glass Stud.*, 45, 183–185 (2003).

L'évaluation de l'état sanitaire de la charpente de Notre-Dame de Paris : pour une étude des insectes ravageurs du bois

Auteur.es de la présentation :

TORITI M.¹, FOHRER F.², GIRARD CLOS O.³, HUNOT J.-Y.⁴, PENAGOS C.³

Affiliation des auteur.es

1- Université de Rennes/CNRS-CReAAH UMR 6566/Rennes.
2- Ministère de la Culture/Centre Interdisciplinaire de Conservation et de Restauration du Patrimoine/Marseille.
3- Université de Franche-Comté/CNRS Chrono-Environnement UMR 6249/Besançon.
4- Département du Maine-et-Loire/CNRS CReAAH UMR 6566/Angers.

RÉSUMÉ :

La charpente de Notre-Dame de Paris est-elle indemne de toute attaque d'insectes xylophages ? Hormis des annotations sur les relevés de Fromont et Trentesaux (2015), aucune étude spécifique n'avait encore été réalisée à ce jour pour déterminer les infestations de la charpente par les ravageurs du bois pour les périodes plus anciennes et son impact sur l'ensemble de la structure.

Ainsi, dans le cadre du programme CASIMODO (coord. A. Dufrasse, MNHM, AASPE UMR7209), une étude anthraco-entomologique a été réalisée dont l'objectif principal a été de rechercher et de caractériser ces agents biologiques au sein des vestiges carbonisés de la charpente afin d'en évaluer l'état sanitaire.

Actuellement, il existe près de 600 espèces d'insectes xylophages ayant chacun une biologie particulière : attractivité alimentaire quasi-exclusive pour les arbres dépérissant, stockés, morts au sol ou ouvragés ; attaque du cambium, de l'aubier et/ou du duramen ; spécialisation aux essences feuillues ou résineuses. Ainsi, de nouvelles perspectives d'interprétations sont possibles et mettent en exergue des pratiques et des gestes des sociétés médiévales et modernes : de la protection et l'entretien du bois d'œuvre aux choix et à la gestion de la matière première.

L'identification des insectes xylophages s'effectue à partir de l'observation des traces que les larves laissent dans le bois : les galeries et la vermoulure (déjections de la larve) et parfois quelques élytres préservés. Grâce à la création récente de normes et de référentiels, basées sur la morphométrie et l'aspect macro- et microscopique des pelletes fécales des larves, la caractérisation d'espèces ou de genres permet de :

- mesurer l'état sanitaire du bois et l'impact des ravageurs sur les propriétés mécaniques de la pièce puis de la charpente entière
- d'évaluer le moment de l'infestation du bois (arbre sur pied, stockage, en place dans l'architecture) voire, sa durée (nombre de génération d'insecte et durée du cycle évolutif)
- déterminer possiblement l'origine (zone d'humidité, infiltration).

A contrario, si le bois ne présente pas de traces : est-ce que le bois est sain ? Y-a-t-il eu diverses campagnes de protections de la charpente au cours de son fonctionnement ?

Au total, c'est près de 750 pièces de bois qui ont été observées, des périodes médiévales et modernes, cumulant plus de 13 000 individus xylophages. Majoritaire, la grande Vrille (*Xestobium rufovillosum*) a altéré les éléments bas de la charpente (sablières, entrails), et la présence conjointe du charançon du bois (*Hexathrum exiguum*) révèle les problèmes d'humidité en différents endroits de la nef et du chœur. Certaines sablières et de nombreux faux-entrails médiévaux ont été renforcés par des moises au XIX^e s. Ces réparations interviennent dans le cas d'altérations de la charpente pouvant être dues tant à l'action des xylophages et champignons lignivores (purgés de parties dégradées par exemple) que par des ruptures mécaniques du bois.

Les agrafes de Notre-Dame : une lecture de l'incendie par les produits de corrosion du fer

Auteur.es de la présentation :

NEFF D.¹, BOUTENÈGRE L.¹, DAUDRE E.¹, DILLMANN P.¹, SYVILAY D.^{2,3}, AZÉMA A.^{2,3}, L'HÉRITIER M.⁴

RÉSUMÉ :

L'incendie de Notre-Dame a révélé, au sommet des murs gouttereaux qui supportaient la charpente disparue, une série d'agrafes en fer qui liaient entre elles les pierres du monument. Ces agrafes, après s'être altérées dans des conditions de corrosion atmosphérique sous abris depuis leur mise en place au Moyen Âge, ont été exposées pendant quelques heures à l'incendie. L'idée de cette étude est de remonter aux conditions de l'incendie en observant les modifications de la couche de corrosion multiséculaire. En effet, les produits de corrosion formés en conditions atmosphériques sont bien connus par de précédentes études réalisées sur les fers de renforts d'autres monuments médiévaux (cathédrale d'Amiens notamment) et sont constitués principalement d'oxyhydroxydes (goethite, lepidocrocite, etc), instables à haute température et peuvent se transformer en différents types d'oxydes (maghémite, hématite). Par ailleurs, lors de l'exposition aux hautes températures, de nouveaux produits de corrosion peuvent se former par des processus d'oxydation du substrat métallique. Sur plusieurs agrafes prélevées sur la cathédrale lors du chantier de restauration et localisées à différents endroits du chœur et de la nef, la nature des produits de corrosion a été étudiée en combinant microscopie optique et micro spectrométrie raman. Des profils de corrosion très différents ont pu être observés sur les agrafes. Par ailleurs, la formation de wustite (FeO) à la surface du métal et en zone interne de la couche de corrosion a été mise en évidence sur certains profils. Cette phase se formant dans des conditions de températures supérieures à 570 °C n'a pu apparaître que durant l'incendie. L'épaisseur de la couche de wustite formée, dépendant directement de la température, de la durée et de l'apport en oxygène, a pu être mesurée. En la comparant avec celle de la wustite formée sur un corpus de référence d'agrafes anciennes, déjà recouvertes de produits de corrosion atmosphériques multiséculaires et ensuite exposées à différents couples temps-température, il a été possible de discuter des conditions (temps/température) subies par les agrafes. Cet indice, couplé à des considérations générales sur le type de profil de corrosion affinent la vision de l'effet de l'incendie sur les différents matériaux qui constituent la cathédrale. Outre cet apport ayant trait à des considérations sur l'altération des matériaux du patrimoine, cette étude constitue un point de référence pour la détection archéologique et archéométrique des incendies dans les monuments historiques, par l'analyse des métaux de renfort et de leurs produits de corrosion.

Affiliation des auteur.es

1- LAPA IRAMAT/NIMBE,
Université Paris Saclay,
CEA, CNRS, Gif-sur-Yvette

2 - Laboratoire de
Recherche des
Monuments Historiques,
Champs-sur-Marne

3 - Centre de Recherche
sur La Conservation,
Sorbonne Université,
Muséum national
d'Histoire naturelle,
Ministère de La Culture,
CNRS UAR 3224, Paris.

4 - ArScAn, CNRS,
Université de Paris 8,
Nanterre

Les signes lapidaires de Notre-Dame

Auteur.es de la présentation :

MOULIS C.¹

**Affiliation
des auteur.es**

¹ - Université de
Lorraine/UR 1132
SAMA/Nancy

49

RÉSUMÉ :

L'accès inédit à l'ensemble des élévations de Notre-Dame de Paris a permis la découverte de près d'un millier de signes lapidaires répartis dans différents secteurs de la cathédrale. Autrefois regardés avec l'œil d'un érudit collectionneur, ils ont été peu à peu adoptés par les chercheurs, qui commencent à leur appliquer des méthodologies et des finalités diverses. Signatures de tailleurs de pierres ou de carriers, d'ateliers, marques de montage, de hauteur d'assise ou de localisation, leur rôle peut être varié et reste soumis à interprétation. Les recherches récentes, intégrant la tracéologie à l'archéologie du bâti, démontrent que l'étude des signes lapidaires, si elle reste beaucoup affaire de subjectivité, n'en demeure pas moins une véritable source de données pour enrichir les connaissances sur les processus de fonctionnement inhérents à la mécanique et la gestion du chantier. Par leur graphie et leur quantité, ils dévoilent un peu de ces inconnus qui les ont gravés, et sur la considération sociale qu'on leur a octroyée. Par leur répartition au sein du bâtiment, ces signes concourent à la réflexion sur le phasage global du chantier de construction.

Notre étude concerne uniquement les signes lapidaires relevant de la signature d'un tailleur ou d'un atelier. La construction du chœur architectural de la cathédrale dans la seconde moitié du XII^e siècle offre peu de signes, en types comme en nombre, essentiellement répartis sur les arcatures des tribunes hautes. Il s'agit pour la plupart de croix grecques ornées de cupules aux quatre extrémités ou de X plus simples. En revanche, la nef révèle une grande quantité de signes, assez diversifiés, répartis préférentiellement là encore sur les claveaux des arcatures des tribunes hautes, mais présents également sur certaines colonnes de la nef et des bas-côtés, dans les escaliers et la façade occidentale, ainsi que sur les parties hautes de la dernière travée méridionale. On y retrouve des symboles rappelant l'alphabet (A, B, ...), des formes géométriques simples (croix, courbe, angle droit...), des outils ou objets du quotidien (équerre, clef, arbalète...) ou encore des symboles généralement utilisés dans l'assemblage des charpentes. Leur répartition au sein de l'édifice complète les informations obtenues sur les traces d'outils, la mise en œuvre des voûtes ou encore les agrafes métalliques. Elle fait apparaître un chantier de construction au déroulement plus complexe qu'esquissé jusqu'à présent. Plus spécifiquement, les tailleurs de pierres semblent se coordonner plutôt par équipe de deux à quatre individus, sur un programme architectural particulier et plutôt sectorisé au sein de l'édifice.

La recherche sur les verres de couleur des vitraux du XIX^e siècle

Auteur.es de la présentation :
ANCAREL A.¹, PILLET É.²

**Affiliation
des auteur.es**

50

RÉSUMÉ :

Le chantier des vitraux de la cathédrale sous la direction de Viollet-le-Duc s'étendit de 1855, début de la restauration des vitraux médiévaux, jusqu'à l'année 1865, date inscrite sur le vitrail créé pour la dernière chapelle de la nef du côté nord. Durant ces dix années, pas moins de sept peintres verriers furent mis à contribution pour restaurer les vitraux anciens ou restituer le décor vitré de la cathédrale. L'examen des vitraux mené *in situ* lors de l'actuel chantier de restauration a permis de constater la grande variété des verres employés en complément des vitraux anciens ainsi que pour les créations ; cette diversité, tout comme les différences de qualité observées, ont conduit à s'interroger sur la provenance des verres employés par les artistes. Une attention particulière a donc été portée sur ce sujet et une recherche spécifique a été entreprise en archives afin de compléter l'observation *in situ*. S'intéresser à l'origine aussi bien matérielle qu'historique et géographique des verres de couleurs au XIX^e siècle représente un enjeu doublement inédit : ce sujet n'a été jusqu'à présent que peu étudié et il aborde un contexte historique particulier dans l'histoire du vitrail. Après avoir été pratiquement abandonné au XVIII^e siècle, l'art du vitrail a connu un renouveau durant la première moitié du XIX^e siècle, qui s'est cependant heurté à la difficulté d'approvisionnement en verres de couleur. La disparition progressive des commandes de vitraux avait en effet entraîné, dans les verreries produisant du verre coloré, la perte d'un savoir-faire technique. Dès lors, archéologues, industriels et peintres verriers unirent leurs efforts pour retrouver les procédés de fabrication du verre et la création de la manufacture de Choisy-le-Roi, dirigée par le chimiste Georges Bontemps, représenta une étape importante dans ce processus de redécouverte. Cet établissement, qui devint le principal fournisseur de verres colorés pour les vitraux, ferma cependant ses portes peu de temps avant que ne débute le chantier de restauration de Notre-Dame. Notre recherche a donc eu pour but de comprendre où les peintres verriers ayant œuvré à la cathédrale avaient pu s'approvisionner ; une première étape a consisté à dépouiller les annuaires du commerce pour y recenser les principaux marchands et fournisseurs de verre parisiens (1817-1867), puis nous avons procédé au dépouillement, aux Archives nationales, des inventaires après décès de peintres verriers ou de marchands. Bien que l'identité des fournisseurs de verre soit rarement explicitement citée, nous avons pu éclaircir un réseau d'artistes, de marchands et d'industriels, tout en établissant une cartographie des manufactures de verres capables de produire du verre de couleur pour les créations artistiques.

1 - Sorbonne-
Université/Observatoire
des Patrimoines Université
Sorbonne/Paris

2 - Sorbonne-
Université/Centre André
Chastel UMR 8150/Paris

Retrouver l'origine des bois de chênes à partir de leur composition élémentaire - apports et limites de l'analyse μ XRF (ITRAX)

Auteurs de la présentation :

PONTON S.¹, DUPOUEY J.-L.¹, PRICE DUTHEIL G.¹, IMBERT STULC A.², POSZWA A.³, RUELLE J.¹, PAUL T.¹, ROSE C.¹, GIRARD CLOS O.⁴, PENAGOS C.⁴, COUBRAY S.^{2,5}, LEMOINE M.², DUFRAISSE A.²

Affiliation des auteurs

1 - Université de Lorraine - INRAE - AgroParisTech/SILVA UMR 1434 (INRAE)/Nancy

2 - CNRS - MNHN/AASPE UMR 7209 (CNRS)/Paris

3 - Université de Lorraine - CNRS/LIEC UMR 7330 CNRS-UL/Nancy

4 - Université Bourgogne Franche-Comté - CNRS/CHRONO - ENVIRONNEMENT UMR 6249 (CNRS)/Besançon

5 - INRAP Centre - Île-de-France/Pantin

RÉSUMÉ :

L'analyse des compositions chimiques et isotopiques du bois peut apporter des informations essentielles pour l'identification de son origine géographique. Nous montrons dans une communication parallèle (Poszwa *et al.* /session 5) comment ces techniques, combinées à des approches archéologiques et historiques, nous permettent de suggérer une origine géographique aux bois de la charpente de Notre-Dame de Paris. Bien qu'efficaces, elles ont cependant le défaut d'être destructives et lourdes à réaliser, limitant ainsi leur emploi à des cas de figure bien particuliers. Une technique alternative, l'analyse de la microfluorescence X (μ XRF), permet une analyse élémentaire semi-quantitative rapide et sans destruction des échantillons. Nous avons dans cette étude testé les apports et limites de cette approche menée avec un appareil (ITRAX, Cox Analytical) dédié à l'analyse des carottes de bois classiquement employées dans les analyses dendrochronologiques, permettant à la fois la mesure des variations densitométriques et élémentaires à fine résolution spatiale.

Le matériel d'analyse est le même que celui employé dans l'étude sœur mentionnée précédemment : 1) un lot de plus de 200 carottes provenant d'un référentiel constitué d'une sélection de 12 forêts actuelles choisies pour représenter la diversité géologique présente dans le bassin de la Seine, et 2) un lot de 10 carottes provenant de pièces carbonisées de la charpente de Notre-Dame. L'approche a consisté à réaliser des profils radiaux avec un pas de mesure de 200 μ m sur l'ensemble des carottes collectées.

Les éléments détectés sont P, S, Cl, K, Ca, Cr, Mn, Fe & Sr. Leurs variations de l'écorce au cœur dans les arbres contemporains montrent des patrons propres à chaque élément et peuvent être importantes. Des différences sont principalement observées 1) entre l'aubier et le duramen (très marquées pour K & Mn), et 2) entre le bois initial et le bois final qui alternent d'un cerne à l'autre (notamment pour Ca & Cr). Les différences de composition élémentaire du bois entre les 12 forêts sont plus marquées lorsque les analyses sont faites dans l'aubier. A l'inverse, les mesures faites dans le bois initial ne permettent pas une discrimination nettement différente de celle résultant des mesures dans le bois final. Les bois anciens de Notre-Dame, dépourvus d'aubier, montrent également des alternances de contenus élémentaires entre bois initial et final mais aussi des anomalies ponctuelles possiblement révélatrices de contaminations, en particulier au plomb.

L'analyse μ XRF est moins sensible que les analyses ICP-MS (menées en parallèle) mais peut apporter un complément important pour la caractérisation des variations élémentaires dans le matériau analysé qui, dans le cas du bois, n'est pas un bloc homogène. Elle pourrait aussi permettre d'étendre les échantillonnages à moindre coût, voire de remplacer ces analyses lorsque le matériau ne peut être détruit.

Les mortiers de Notre-Dame

Auteur.es de la présentation :

MECHLING J.-M.¹, GALLET Y.², DILIBERTO S.¹, FERRY O.¹, PILLOY L.¹

Affiliation des auteur.es

1 - Université de
Lorraine/Institut
Jean Lamour, UMR
CNRS 7198/Nancy

2 - Université Bordeaux
Montaigne/Ausonius,
UMR CNRS 5607/Pessac

RÉSUMÉ :

Des mortiers et produits de bouchage (liés aux artefacts de construction) de la cathédrale Notre-Dame de Paris ont été prélevés, principalement au niveau des voûtes et des arcs de la nef et du chœur, ainsi qu'au niveau du chevet (piliers du déambulatoire et tribunes). L'échantillonnage a visé la sélection de mortiers qui correspondent, sur le plan chronologique, à l'édification des structures auxquelles ils appartiennent et en évitant autant que possible les restaurations. Le corpus des prélèvements couvre ainsi une période de plusieurs décennies, allant de l'édification du déambulatoire à l'achèvement des voûtes de la nef.

Sur le plan méthodologique, une première étape a consisté à définir une typologie des différents mélanges (liant à base de chaux ou de plâtre, granulométrie et proportion de sable, aspect visuel général). Sept types de mortiers ont ainsi été définis (5 à base de chaux, 2 à base de plâtre). Pour chaque type de mélange, une large palette d'analyses a ensuite été menée sur le plus grand nombre d'échantillons possibles afin de garantir la meilleure représentativité.

Les investigations ont permis de caractériser précisément les propriétés physiques des différents types de mélanges (masses volumiques réelles, distribution et volume des pores mesurés par injection de mercure), puis de déterminer les caractéristiques des sables et liants employés. Les analyses par Fluorescence et par Diffraction des Rayons X ont permis des analyses quasi systématiques (en complément des observations en lames minces au microscope polarisant, menées sur un nombre d'échantillons plus limité) qui ont mis en évidence certaines particularités, propres aux gisements exploités (sables et/ou liants utilisés). Mais les analyses de type Rietveld menées sur les clichés de diffraction des RX ont également permis de constater une certaine régularité des mortiers au sein des différents types définis. L'analyse fine des liants a nécessité de recourir à des analyses thermogravimétriques et enthalpiques. Elles ont notamment montré la pureté prononcée de la chaux employée, sans effets particuliers d'hydraulicité ou de pouzzolanité.

Enfin, l'utilisation de coupes sériées, non destructives, réalisées en tomographie X, permet de retrouver les compositions volumiques des différents constituants des mortiers et de remonter ainsi aux compositions des mortiers originels, qui ont pu être reconstitués.

En définitive l'analyse détaillée des mortiers a montré un nombre assez limité de mélanges, répartis sur l'intégralité de la zone étudiée. Les mortiers les plus fins en granulométrie semblent cependant majoritairement utilisés dans l'édification des voûtes et des arcs. Sur le plan technologique, ces constats tendraient à montrer une régularité et une transmission des compositions des mélanges. Des analyses sont en cours pour appréhender certaines interrogations au niveau des datations, soulevées par la présence accidentelle de fibres colorées (bleues et rouges) retrouvées dans presque tous les mélanges prélevés.

Effet du vieillissement naturel sur les propriétés du bois de chêne

Auteur.es de la présentation :

BOURCHANIN M.^{1,2}, MATSUO-UEDA M.^{2,3}, GIRARDCLOS O.⁴, BROSSIER B.⁵, GRIL J.^{1,6}

RÉSUMÉ :

Connaître des propriétés du bois ancien est nécessaire aux prises de décision des ingénieurs confrontés au remploi d'éléments de structure issus de la déconstruction de bâtiments anciens comme du maintien en service d'un monument historique. Les recherches menées au Japon à partir de bois récupérés de constructions traditionnelles (Kohara 1958) ont mis en évidence quelques tendances pour l'effet du vieillissement naturel: dégradation de polysaccharides, assombrissement (Matsuo et al 2011), peu d'effet sur la rigidité voire la résistance, décroissance de l'énergie de rupture et cela surtout dans la direction transverse au fil (Yokoyama et al 2009)... Ces effets sont assez similaires à ceux d'un traitement thermique, même si des observations contradictoires sont rapportées (Kranitz et al. 2016). De telles recherches se heurtent à deux difficultés majeures : l'obtention d'un échantillonnage bien identifié de bois anciens et la variabilité intrinsèque du matériau. Le bois récupéré de la charpente brûlée de Notre-Dame de Paris représente à ce double égard une opportunité exceptionnelle : on dispose en effet d'une source de matériel d'étude inhabituellement abondante de bois de chêne mis en œuvre il y a 1 à 8 siècles, dont la datation précise fait déjà l'objet d'un travail en cours dans le cadre de l'ANR Casimodo. Mené en marge de cette ANR, le présent projet vise à caractériser l'évolution des propriétés du bois de chêne avec son âge.

Le vieillissement dont il est question ici est la lente oxydation en volume, indépendamment de l'effet additionnel de la dégradation de surface (*wheathering*) ou de l'endommagement induit par des actions mécaniques ou hygromécaniques. Dans le cas du bois de NDP il convient également de considérer l'effet de l'incendie, se traduisant par la présence d'une enveloppe de bois carbonisée autour des restes de poutres, et, sous cette enveloppe, d'un bois « torréfié » modifié par la chaleur en plus de l'âge. Des observations basées sur l'analyse de la couleur suggèrent que cette perturbation ne concerne que les 1-2cm extérieurs des pièces récupérées. Les premiers résultats obtenus vont être présentés et analysés, ainsi que les difficultés inhérentes à la manipulation d'échantillon pollués au plomb.

RÉFÉRENCES

Kohara J. (1958) Study on the old timber, Res. Report Fac. Engin., Chiba University 9 (15):1-55

Kranitz K., Sonderegger W., Bues C.T., Niemz P. (2016) Effects of aging on wood : a literature review, Wood Sci. Technol. 50(1):7-22.

Matsuo M., Yokoyama M., Umemura K., Sugiyama J., Kawai S., Gril J., Kubodera S., Mitsutani T., Ozaki H., Sakamoto M., Imamura M. (2011) Aging of wood: Analysis of color changes during natural aging and heat treatment, Holzforschung 65(3):361-8.

Yokoyama M., Gril J., Matsuo M., Yano H., Sugiyama J., Clair B., Kubodera S., Mitsutani T., Sakamoto M., Ozaki H., Imamura M., Kawai S. (2009) Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings, C.R. Physiques 10(7):601-11.

Affiliation des auteur.es

1 - Institut Pascal, Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP, Clermont-Ferrand

2 - Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Japan

3 - Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Japan

4 - Chrono-environnement, Univ. Franche Comté, CNRS, Besançon

5 - Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier, Univ Montpellier, CNRS, IRD, Montpellier

6 - Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, Clermont-Ferrand, France

Interactions charpente-maçonnerie sur une travée du chevet de Notre-Dame : report des charges de vent et rôle des renforts métalliques (agrafes, tirants, ...).

Auteur.es de la présentation :

TAFORÉL P.¹, BERNARD M.², MORENON P.³, NOUGAYREDE P.⁴, COUREAU J.-L.⁵, COINTE A.⁵, PARENT T.⁵, DUBOIS F.⁶, L'HÉRITIER M.⁷, CIBLAC T.⁴, MOREL S.⁵

RÉSUMÉ :

Les travaux de reconstruction de la cathédrale Notre-Dame de Paris suite à l'incendie du 15 Avril 2019 ont amené les différentes équipes de chercheurs à faire une plongée dans l'histoire de l'ouvrage et à redécouvrir et mettre au jour des facettes oubliées de cet édifice. Si cette dimension est au cœur des thématiques de recherche de certains groupes de travail du chantier scientifique, elle semble plus éloignée des travaux menés par d'autres groupes à l'instar du GT "Structures" travaillant à l'évaluation de la stabilité des parties maçonnées (voûtes sexpartites, arcs-boutants et murs gouttereaux) et sur la charpente de la cathédrale. C'était sans compter sur la redécouverte d'éléments métalliques dans la structure (agrafes dans la partie sommitale des murs gouttereaux invisibles avant l'incendie) venant s'ajouter à d'autres éléments métalliques quant à eux connus (tirants) de la cathédrale et venant constituer une ceinture de fer sur la partie haute de la cathédrale où la pierre laisse place au bois. La découverte de ces éléments a donné lieu à un travail collaboratif entre le GT "Métal" et le GT "Structures" afin de comprendre le rôle joué par le métal dans cette zone de transition entre la maçonnerie et la charpente de l'ouvrage par le biais de la modélisation numérique au cœur des travaux du GT "Structures".

Affiliation des auteur.es

1 - MiMeTICS engineering, Montpellier, France

2 - LAPA, IRAMAT, Université Paris-Saclay, CEA/CNRS

3 - LMDC, Université de Toulouse, UPS, INSA, Toulouse, France

4 - GSA, École Nationale Supérieure d'Architecture Paris Malaquais, Université PSL, Paris, France

5 - Université de Bordeaux, UMR5295, Bordeaux, France

6 - LMGC, Université Montpellier, CNRS, Montpellier, France

7 - ArScAn, Université Paris 8, Vincennes Saint-Denis, France

Séchage du bois « vert » : mécanismes et conséquences sur la tenue des structures

Auteur.es de la présentation :

CARÉ S.¹, MAURIN E.^{2,3}, COUREAU J.-L.³, ARCHEZ J.¹, COINTE A.³, BOUHLEL S.^{2,3}

RÉSUMÉ :

Le laboratoire Navier et le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, dans le cadre d'un appel à projet « amorçage »¹ de l'université Paris-Est Sup, ont mené depuis 2022 des études sur le séchage du bois « vert ». Le projet « BâtiBoisVert » vise à mieux préciser les effets du séchage du bois vert sur la tenue structurelle du bâti bois, plus précisément à mieux comprendre le comportement hydro-mécanique du chêne à l'état vert, pour permettre d'expliquer la tenue des assemblages dans les bâtiments anciens, mais aussi à terme pour proposer des solutions pour la construction neuve (ou pour la restauration de monuments). Le LRMH avait en effet montré pour des structures du patrimoine construites avec du bois vert, qu'il existe des assemblages rompus et que ces ruptures ne peuvent pas toutes être expliquées par des mouvements globaux de la structure ou par les efforts appliqués. Les travaux proposés dans le cadre de cet AAP visaient à préciser si les dommages observés peuvent être expliqués par les déformations du bois vert en cours de séchage en tenant compte des mécanismes de séchage.

Les analyses ont été réalisées à plusieurs échelles :

A l'échelle de la (micro)structure du bois pour identifier les relations entre l'humidité du bois et les déformations induites. Ces travaux ont permis de préciser les mécanismes de séchage des eaux liées et libres.

A l'échelle de poutres de sections 20x20 cm² (ou de tranches de même section) pour étudier les cinétiques de séchage et les effets induits, notamment la fissuration.

L'ensemble de ces travaux a nécessité de mettre au point des expérimentations spécifiques (programme expérimental et techniques expérimentales locales ou globales) et a permis de préciser les phénomènes physiques en jeu (par exemple pour les fissures induites par le retrait de séchage en lien avec le front de séchage).

Les essais se poursuivent actuellement notamment avec des poutres de sections plus petites (10x10 cm²) et les résultats obtenus permettront aussi de proposer des modélisations couplées hydro-mécaniques.

¹ Sabine Caré, Emmanuel Maurin. *Projet BâtiBoisVert* : Construction en bois « vert », Analyse multi-échelle du séchage sur la tenue des structures. Journée Scientifique Paris-Est Sup - Bilan des aap Amorçage 2021, Paris-Est Sup, Sep 2023, Champs Sur Marne, France. hal-04354556

Affiliation des auteur.es

1 - Université Gustave Eiffel / Laboratoire Navier / Champs-sur-Marne

2 - Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques / Champs-sur-Marne

3 - Université de Bordeaux / I2M / Bordeaux

Caractérisation mécanique des pierres de Notre-Dame de Paris par mesure de la vitesse de propagation du son

Auteur.es de la présentation :

DOMEDE N.¹, PARENT T.², GUENSER C.¹, BOUKHAM A.², MORENON P.¹, ISSA-IBRAHIM A.¹

Affiliation des auteur.es

1 - LMDC, Université de Toulouse, UPS, INSA, Toulouse, France

2 - Université de Bordeaux, UMR5295, Bordeaux, France

RÉSUMÉ :

La cathédrale Notre-Dame de Paris a été construite au XII^e siècle avec de la pierre calcaire lutétienne provenant de plusieurs carrières du bassin parisien, et a été rénovée à plusieurs reprises. L'objectif de la recherche présentée ici est de déterminer les paramètres mécaniques de ces calcaires indispensables pour les modèles de calcul et leur variabilité sur l'ensemble de la structure. Pour cela, une large campagne de mesures non destructives de la vitesse de propagation ultrasonore a été réalisée par deux équipes en parallèle (Laboratoires LMDC Toulouse et I2M Bordeaux) sur l'ensemble des éléments structuraux d'une travée du chœur de la cathédrale : culées, piles, murs bahuts et murs gouttereaux, voûtes à croisée d'ogive sexpartite et quadripartite et arcs-boutants. Des mesures parallèles et perpendiculaires aux lits de pose et des mesures à cheval sur les joints de mortier ont été réalisées.

Les résultats de la campagne d'essais et les principales conclusions seront présentés. Il est montré notamment que les pierres présentent une faible anisotropie, une forte variabilité à l'échelle d'un élément structural et des performances variables selon l'élément structural considéré. Cette dernière observation atteste du savoir-faire des bâtisseurs de l'époque gothique dans le choix des pierres. Les données de vitesse du son sont ensuite exploitées pour estimer les paramètres mécaniques des éléments structuraux de Notre-Dame de Paris au moyen de lois de corrélation proposées pour les calcaires lutétiens.

Tassement de la façade ouest de Notre-Dame – Réactions du chantier médiéval

Auteur.es de la présentation :
ALBRECHT S., MENARGUES À

**Affiliation
des auteur.es**

Universität Bamberg,
chaire de l'histoire d'art

57

RÉSUMÉ :

Sur la base d'un relevé précis de tous les portails ouest de Notre-Dame, le poster décrit les tassements de la façade ouest qui se sont manifestés immédiatement après le début de la construction. Ces tassements sont d'un grand intérêt pour la recherche, car ils prouvent que les trois portails ont été construits en même temps. Ils permettent en outre de tirer des conclusions sur la nature des fondations. Le poster explique quand le chantier a remarqué ces affaissements et comment les maîtres d'œuvre ont réagi : « Il ne s'agissait pas pour les maîtres d'œuvre de stopper les affaissements. Ils devaient réagir pour que les voussoirs déjà produits avec les sculptures finies puissent continuer à être utilisés pour la construction des portails. Les affaissements donnent ainsi un aperçu du chantier médiéval de Notre-Dame. »

Évaluation structurale des voûtes de la cathédrale Notre-Dame de Paris par le calcul à la rupture

Auteur.es de la présentation :

COLAS A-S.¹, GARNIER D.², DUBOIS F.³, MOREL S.⁴, MORENON P.⁵, NOUGAYRÈDE P.⁶, PARENT T.⁷, TAFORÉL P.

RÉSUMÉ :

Au sein du groupe de travail « Structures » du chantier scientifique afférent à la reconstruction de la cathédrale Notre-Dame de Paris, une équipe de chercheurs travaille à l'évaluation de la stabilité des voûtes sexpartites, arcs-boutants et murs gouttereaux de la cathédrale. En effet, si certaines parties de la voûte se sont effondrées sous l'impact de la flèche, la majorité de l'ossature maçonnerie est restée en place. Il se pose ainsi la question de sa stabilité résiduelle suite à l'incendie, pour garantir la sécurité des intervenants du chantier et assurer la reconstruction des éléments détruits sur l'ossature en place. Pour procéder à l'évaluation structurale des éléments de structure en maçonnerie, l'équipe a proposé un benchmark de modélisations, confrontant, sur la base d'hypothèses identiques, différentes approches de caractérisation du matériau (approche continue ou bloc à bloc) et de calcul (méthode aux éléments finis ou aux éléments discrets).

En complément des simulations du comportement de la structure, une approche dans le cadre de la théorie du calcul à la rupture a été proposée. Ce type de raisonnement, basé sur la compatibilité entre l'équilibre de la structure et la résistance de ses matériaux constitutifs, permet de déterminer de manière directe la charge conduisant à sa ruine. Le calcul à la rupture a déjà été utilisé pour évaluer la stabilité de ponts-voûtes en maçonnerie sous charge volumique et de panneaux en béton armé ou en maçonnerie sous l'effet d'un incendie.

Ces travaux sont ici mis à profit pour évaluer la stabilité au feu des voûtes et arcs-boutants de Notre Dame. Les éléments de structures sont traités en 2D, sous l'hypothèse des déformations planes. La maçonnerie est modélisée comme un ensemble de blocs rigides liés entre eux par des joints cohérents et frottants. L'effet de l'élévation de température est pris en compte par une dégradation des capacités de résistance à l'échelle du matériau et une géométrie déformée à l'échelle de la structure.

Le calcul permet de déterminer la poussée extrême des voûtes et des arcs-boutants, fournissant ainsi un majorant aux résultats obtenus par éléments finis et discrets. Il permet également de mener des analyses paramétriques à grande échelle pour évaluer l'influence de la géométrie, du chargement ou de la résistance des matériaux sur la stabilité de la structure.

Affiliation des auteur.es

1 - GERS-RRO, Université Gustave Eiffel, Université de Lyon, Lyon, France

2 - Navier, École des Ponts ParisTech, Université Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France

3 - LMGC, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

4 - Université de Bordeaux, UMR5295, Bordeaux, France

5 - LMDC, Université de Toulouse, UPS, INSA, Toulouse, France

6 - GSA, École Nationale Supérieure d'Architecture Paris Malaquais, Université PSL, Paris, France

7 - MiMeTICS engineering, Montpellier, France

Le rôle transversal du groupe de travail “données numériques” : l'écosystème Notre-Dame pour l'analyse et la mémorisation du chantier scientifique

Auteur.es de la présentation :

ABERGEL V.¹, ARESE P.¹, BLETTERY E.¹², BRÉDIF M.², CHRISTOPHE S.², COMTE F.¹, DE LUCA L.¹, EBERLIN A.¹, ESPINASSE L.³, GOUET-BRUNET V.², GRANIER X.³, GROS A.¹, GUILLEM A.¹, HERSENT M.¹², JACQUOT K.⁴, MALAVERGNE O.⁵, MARLET O.⁶, MOUADDIB E. M.⁷, NÉROULIDIS A.¹, PAMART A.¹, PIERROT-DESSEILLIGNY M.², RODIER X.⁶, ROUSSEL R.¹, RÉBY K.¹, SALERI R.⁴, TOURNON S.³, VODISLAV D.⁸, WILLOT L.¹²⁸, ROUSSET M.⁹

RÉSUMÉ :

Dans le cadre du chantier scientifique Notre-Dame de Paris, l'interaction entre différentes disciplines est d'importance capitale pour redéfinir les méthodes de collaboration et enrichir la compréhension des objets patrimoniaux. À travers le prisme de l'interdisciplinarité, les défis scientifiques relevant des données numériques s'étendent au-delà de la dimension physique des objets d'étude pour englober l'analyse des mécanismes complexes de production de connaissances. Notre groupe de travail, composé d'ingénieurs, d'architectes, d'archéologues, d'historiens et d'informaticiens, fusionne des compétences variées, de la métrologie à la reconstruction géométrique, en passant par le développement de systèmes de gestion de données hétérogènes et la création d'environnements d'analyse et d'enrichissement de représentations multi-dimensionnelles.

Nous visons à créer un «écosystème numérique» qui soutienne l'étude scientifique et la restauration de la cathédrale, intégrant progressivement données, informations et connaissances de divers spécialistes, des scientifiques aux acteurs de la restauration. Le groupe travaille sur quatre axes principaux : la collecte et l'intégration des données numériques existantes, la génération de nouvelles données, leur partage et archivage durable, ainsi que leur structuration et enrichissement sémantique.

Notre démarche combine des éléments scientifiques, méthodologiques et technologiques, se positionnant à l'intersection des sciences numériques humaines, de la science du patrimoine et de l'informatique. Scientifiquement, le projet emploie des mécanismes de corrélation pour gérer et analyser d'importants ensembles de données, se concentrant sur la spatialisation des ressources, l'annotation, la classification, le suivi des activités et l'analyse des thématiques interdisciplinaires.

Méthodologiquement, nous scrutons les activités liées à l'objet d'étude, révélant les parcours des chercheurs dans la production, l'analyse et l'interprétation des données, cherchant à saisir la spécificité des connaissances mobilisées par chaque discipline et leur interaction avec les caractéristiques des objets étudiés.

Sur le plan technologique, le projet ambitionne de développer une plateforme numérique ouverte, dotée d'outils pour la gestion des ressources numériques et d'un moteur autonome pour l'enrichissement et la corrélation continus des données, en prenant en compte des attributs tels que la forme, l'espace et le temps.

Affiliation des auteur.es

- 1 - CNRS/MAP/Marseille.
- 2 - IGN/LASTIG/Paris.
- 3 - CNRS/Archeovision/Bordeaux.
- 4 - ENSAL/MAP-Aria/Lyon.
- 5 - MC/LRMH/Paris.
- 6 - CNRS/CITERES/Tours.
- 7 - UPJV/MIS/Amiens.
- 8 - CNRS/ETIS/Cergy-Pontoise.
- 9 - CNRS/MOM/Lyon

Une plateforme logicielle pour centraliser, enrichir et spatialiser des données hétérogènes.

Auteur.es de la présentation :

ABERGEL V.¹, CALLIERI M.², CAO I.¹, DE LUCA L.¹, GUILLEM A.^{1,3}, MALAVERGNE O.³, MANUEL A.¹, NÉROULIDIS A.¹, POUYET T.⁴, ROUSSEL R.¹, ROUSSET M.⁵, TOURNON S.⁶

RÉSUMÉ :

Ce poster concerne la conception, le développement et le déploiement d'une plateforme numérique pour la centralisation des données du chantier scientifique Notre-Dame de Paris. Face à l'ampleur des forces impliquées dans le chantier scientifique, le besoin d'avoir une plateforme centrale pour la gestion des données s'est fait sentir dès le début. Le premier défi a été de définir un plan qui puisse s'adapter aux différents besoins et méthodologies de recherche, mais aussi de structurer le cycle de vie des données et les protocoles de production. Nous avons dû définir des protocoles spécifiques pour la production de données, comparer et clarifier les différentes procédures des groupes, identifier les phases clés dans le cycle de vie des données et, enfin, adapter ou développer des outils sur mesure. En combinant technologie et expérience humaine, la plateforme facilite la création, l'intégration, le partage et l'analyse de vastes données scientifiques sur l'étude post-incendie multidisciplinaire de la cathédrale. Cette approche stratifiée inclut la construction d'une communauté pour l'étude collaborative, des outils numériques personnalisés pour différents profils, des approches de structuration des données pour gérer les caractéristiques multidimensionnelles des objets matériels, et des flux de travail basés sur l'expérience pour documenter, catégoriser et enrichir sémantiquement les données.

Notre plateforme numérique comprend un ensemble d'outils pour l'ingestion de données (Esmeralda), l'indexation de contenu (ArcheoGRID), la structuration du thésaurus (Opentheso), l'exploration interactive 3D des vestiges archéologiques (3DHOP), l'annotation 3D basée sur des photos (Aïoli) et l'exploration multimodale du corpus de données à l'échelle architecturale (NDP 3D Viewer). Outre que à fournir un support important au travail collaboratif, le développement de cette plateforme vise la mémorisation du processus de production de données et leur archivage à long terme. Cette question traverse l'ensemble du flux de données pour enregistrer les moments clés de son enrichissement sémantique (activité technique ou intellectuelle, acteur, ...) et le contextualiser dans la totalité des activités menées par la communauté d'acteurs. Ce travail inclut également l'alignement des données, métadonnées et paradonnées avec les normes existantes.

Affiliation des auteur.es

- 1 - CNRS/MAP/Marseille.
- 2 - Visual Computing Lab/ CNR-ISTI/Pisa.
- 3 - MC/LRMH/Paris.
- 4 - CNRS/CITERES/Tours.
- 5 - CNRS/MOM/Lyon.
- 6 - CNRS/Archeovision/ Bordeaux.

Des objets matériels aux données numériques : enjeux de numérisation multi-échelle et multi-temporelle

Auteur.es de la présentation :

COMTE F.¹, PAMART A.¹, ESPINASSE L.², GATTET E.³, MOUADDIB E. M.⁴, SALERI R.⁵

RÉSUMÉ :

La numérisation par l'image joue un rôle central en tant que vecteur d'interaction entre les réalités du terrain, les méthodes d'analyses et d'interprétations, par le biais des modèles 3D résultants, mais aussi (et surtout) des collections d'images sources positionnées dans le même espace 3D. Sur cette base, il est possible d'enrichir les données d'un ensemble de métadonnées descriptives et techniques, mais aussi de parodonnées contextuelles afin d'interconnecter des données hétérogènes et complexes, quels que soient leurs périmètres d'observation.

Notre poster se concentre sur les stratégies qui ont été conçues et mises en œuvre pour consolider les activités de numérisation : d'une part, pour les vestiges architecturaux, des parties de la cathédrale ayant été numérisées à plusieurs reprises avant et après l'incendie ; d'autre part, l'ensemble des vestiges représentant des milliers d'artéfacts (pièces de bois, d'objets en pierre et de métal). Ces derniers ont été documentés sur place puis stockés dans des entrepôts aménagés pour travailler en toute sécurité dans un contexte de pollution au plomb. Ces stratégies déployées s'articulent autour de deux concepts complémentaires : l'harmonisation, pour une meilleure comparabilité des données ; l'optimisation, pour gérer l'important flux de données.

Pour ce faire, lors des phases d'acquisition des données, le GT Numérique a développé des solutions spécifiquement dédiées à chacune des problématiques soulevées par le sous-ensemble du corpus architectural et mobilier de Notre-Dame. Ces équipements ad hoc s'accompagnent de protocoles et mobilisent divers dispositifs d'acquisition, dont certaines structures entièrement automatisées. À l'échelle architecturale, les numérisations par drone et scanner laser ont permis une couverture complète des espaces internes et externes de la cathédrale. Un système automatique, le « cable-cam », a permis une acquisition de données dans les zones dangereuses ou fragiles, notamment l'extrados des voûtes. En parallèle, les éléments de mobiliers étudiés par les différents GT sont numérisés entièrement grâce à des dispositifs créés de toutes pièces pour s'adapter aux caractéristiques morphologiques, dimensionnelles et colorimétriques variées des vestiges. En outre, ces numérisations sont optimisées (en matière d'économie de temps, de ressources et de stockage), et chaque processus de modélisation est harmonisé avec les autres afin de délivrer des collections numériques homogènes intégrées dans l'écosystème numérique NDame. Afin de garantir la traçabilité et donc de renforcer le potentiel de réexploitation de cette documentation nativement numérique, un système de suivi par le biais de description fine de métadonnées et de parodonnées accompagne les données de leur capture jusqu'à leur curation.

La temporalité longue et évolutive des stratégies de numérisations déployées pour le chantier scientifique de Notre-Dame a ainsi été un terreau fertile aux diverses expérimentations conduites pour enrichir ce corpus de données si particulier, mais aussi nourrir des réflexions sur leur usage par et pour la recherche, et en articulation fine avec le chantier de restauration et les problématiques de conservation à court, moyen et long terme.

Auteur.es de la présentation :

**Affiliation
des auteur.es**

1 - MAP - UPR 2002
(CNRS), Marseille

2 - Archéosciences,
plateforme
Archéovision / Archéovision
Production, Bordeaux

3 - SAS Mercurio Imaging,
Marseille

4 - Université de Picardie
Jules Verne, Amiens

5 - MAP - ARIA (ENSAL),
Lyon

Des données numériques aux connaissances pluridisciplinaires : enjeux de documentation et de formalisation

Auteur.es de la présentation :

ABERGEL V.¹., ARESE P.¹., COMTE F.¹, DUDEK I.¹, GUILLEM A.¹, GROS A.^{1,2}, REBY K.¹

Affiliation

des auteur.es

62

RÉSUMÉ:

Le chantier scientifique fait converger de nombreux regards sur un même objet d'étude. Profondément pluridisciplinaire, il mobilise des acteurs de profils différents, sollicitant des méthodes, technologies, procédés d'analyse variés, à différentes échelles, différents états temporels, et sur des thématiques multiples. Le GT Numérique a la responsabilité de la gestion et de la conservation de ces données du patrimoine que l'on peut caractériser comme big data multidimensionnelles du fait de leurs aspects hétérogènes et massifs. Cela implique des défis de traçabilité, d'analyse, d'interrogation, ou encore de visualisation. Dans ce poster, nous nous concentrons sur les problèmes spécifiques de la documentation de provenance, de l'intégration des données et de l'archivage à court et long terme.

Les sciences du numérique fournissent de nombreux développements méthodologiques applicables aux données patrimoniales, en particulier pour l'inférence de données pluridisciplinaires. Ces approches présupposent une matière d'entrée structurée, ce qui impose une réflexion sur les conditions de production de données et leur cycle de vie. Les données de Notre-Dame de Paris reflètent cette densité et la complexité de leur contexte de production : l'enrichissement des données vise à mémoriser (1) ce qui concerne l'objet physique dans sa matérialité (formes, aspect, composition physico-chimique, ...), (2) l'objet digital (provenance des données), et (3) l'objet de connaissance (question de recherche, contexte etc). Toutefois, s'il est difficile d'établir efficacement la provenance des données tout au long de leur cycle de vie (métadonnées, paradosées...), il est plus difficile encore d'explicitier la provenance de la connaissance, c'est-à-dire des processus intellectuels ayant trait à leur interprétation et aboutissant à l'émergence de nouvelles connaissances, puis de capitaliser sur ces dernières afin de les réinjecter dans le corpus. De plus, dans le cas du patrimoine, ce ne sont pas tant les représentations numériques de l'objet d'étude qui ont de la valeur que tout ce qu'elles sont susceptibles de véhiculer pour une communauté d'acteurs à travers des regards orientés. Notre travail explore le chemin qui mène de la génération de données à la production de connaissances. D'un point de vue technique, une multiplicité d'outils et de méthodes sont utilisées dans le traitement des données : la documentation, la curation, et la transformation des données convergent vers des approches de gestion de données multimodales en graphes (graphe de données, graphe de connaissance) associées à des workflows d'enrichissement utilisant du deep learning. L'enrichissement sémantique est donc un pont essentiel permettant une connexion durable entre la connaissance et l'analyse humaine d'une part, et le traitement informatique d'autre part.

1 - UPR 2002 MAP - Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine, CNRS, Marseille

2 - UMR CNRS 5508 LMGC, Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil de Montpellier

Explorer un corpus de données interconnectées au prisme des dimensions spatiales, temporelles et sémantiques.

Auteur.es de la présentation :

ABERGEL V¹., BLETTERY E.^{1,2}, BRÉDIF M.², CHRISTOPHE S.², DE LUCA L.¹, EBERLIN A.¹, GOUET-BRUNET V.²., GUILLEM A.¹, HERSENT M.^{1,2}, ROUSSEL R.¹, REBY K.¹, VODISLAV D.³, WILLOT L.^{1,2,3}

RÉSUMÉ:

La cathédrale Notre-Dame de Paris est un objet d'étude profondément transversal, mobilisant une grande variété de disciplines, d'échelles d'observation, ou encore de méthodes d'analyse. Qu'il s'agisse de modèles 3D, collections d'images, ou d'échantillons d'analyses physico-chimiques, toutes ces ressources alimentent quotidiennement des besoins variés de suivi, d'analyse, de documentation, d'archivage, ou encore de valorisation. Les données collectées ou produites progressivement par les membres impliqués dans son étude présentent en conséquence une forte hétérogénéité. Elles s'illustrent de plus par leur caractère multidimensionnel, les données évoluant à la fois dans l'espace (3D), dans le temps (4D), mais pouvant aussi faire référence à des dimensions sémantiques ou thématiques variées (nD).

Paradoxalement, leur intelligibilité et leur potentiel analytique semblent inversement proportionnels à la richesse des représentations agrégées. Dans ce contexte, l'exploration et l'exploitation de données numériques hétérogènes et multidimensionnelles constitue un enjeu majeur, face auquel il s'agit de proposer de nouvelles modalités de visualisation et d'analyse permettant de croiser les regards pluridisciplinaires portés sur un même objet d'étude. La navigation dans un espace nD apparaît donc cruciale, l'ambition étant d'offrir aux membres du chantier scientifique une entrée croisée par la sémantique, l'espace et le temps sur les ressources disponibles. Toutefois, si dans un grand volume de données l'extraction de vues pertinentes en réponse à des besoins explicites est loin d'être triviale, il est plus délicat encore d'offrir des outils permettant de faire émerger des connexions fortuites par la mise en relation d'éléments ou phénomènes en apparence disjoints grâce à l'utilisation simultanée de leurs propriétés multidimensionnelles. Par sa capacité à mettre à profit l'apport d'une action collective en coproduisant données et connaissances, l'enrichissement sémantique constitue un élément clé du passage entre données numériques hétérogènes et connaissances pluridisciplinaires.

Face à ces enjeux, plusieurs contributions ont été proposées. D'une part, des scénarios et stratégies d'enrichissement sémantique ont été mis en place, notamment à travers la construction d'annotations 2D et 3D, intégrant aussi bien les éléments relatifs aux constats d'état dressés par les architectes, que des analyses produites par les différents groupes de travail. D'autre part, nous avons proposé de nouvelles méthodes permettant de construire et caractériser des relations entre les données et les connaissances mobilisées, en exploitant à la fois leur contenu visuel et leurs attributs spatiaux, temporels et sémantiques. Enfin, différentes approches sont à l'étude, concernant la mise à disposition des données par le biais de nouvelles modalités d'exploration, notamment à travers l'exploitation conjointe de graphes de connaissances et d'outils de visualisation 3D sur le web.

Affiliation des auteur.es

1 - UPR 2002 MAP - Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine/CNRS/Marseille

2 - LaSTIG/Univ Gustave Eiffel/ENSG, IGN, LASTIG, F-94160/Saint-Mandé

3 - ETIS UMR8051, ENSEA, CNRS/CY Cergy Paris University/Cergy

La mémoire isotopique de la forêt de Notre-Dame a-t-elle résisté à l'incendie ?

Auteur.es de la présentation :

DU BOISGUEHENEUC D.^{1,4}, ROCHA E.⁴, DELARUE F.³, DAUX V.^{1,2}, NGUYEN TU T. T.³, DUFRAISSE A.⁴

RÉSUMÉ :

Les compositions isotopiques du bois, telles que $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$, sont couramment utilisées de manière complémentaire pour étudier l'évolution des climats passés, notamment la température atmosphérique et le stress hydrique des arbres. Récemment, l'analyse isotopique des signatures du charbon de bois gagne en intérêt pour la reconstitution des changements paléoclimatiques en contexte archéologique. La carbonisation induit une transformation de la structure physico-chimique du bois, résultant de processus de dégradation thermique progressifs de ses constituants. Ce phénomène engendre la formation de cycles aromatiques stables et la réorganisation de la structure en composés condensés. Par conséquent, les charbons de bois présentent une augmentation relative de leur teneur en carbone et cette transformation s'accompagne également d'une diminution de la teneur en hydrogène et en oxygène, attribuable à la perte de groupes fonctionnels avec l'augmentation thermique. Le processus de carbonisation implique de ce fait des changements dans la signature isotopique du $\delta^{13}\text{C}$ et du $\delta^{18}\text{O}$. A la suite de l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris et de la destruction partielle de la charpente, des études ont été entreprises pour retracer l'évolution du $\delta^{13}\text{C}$ et du $\delta^{18}\text{O}$ du bois de chêne au cours de la carbonisation. Les enjeux sont abordés par des approches expérimentales pour tester le potentiel des reconstructions paléoenvironnementales pour le $\delta^{13}\text{C}$, indicateur climatique déjà étudié sur du bois brûlé, et appréhender les processus de fractionnement du $\delta^{18}\text{O}$, dont les trajectoires thermiques n'ont pas encore été étudiées sur le bois.

Des études de combustion en conditions contrôlées ont été menées sur du bois de chêne (*Quercus* sp.) et comparées avec des valeurs avant carbonisation afin d'évaluer la préservation de ces deux signatures isotopiques.

Les résultats révèlent que pour le $\delta^{13}\text{C}$, en raison de la dégradation thermique préférentielle de la cellulose et de l'hémicellulose enrichies en ^{13}C lors de la carbonisation, à des températures supérieures à 500 °C, la combustion entraîne un appauvrissement progressif du $\delta^{13}\text{C}$ d'environ 1 ‰ par rapport aux valeurs initiales. Malgré cet appauvrissement, testé à l'échelle interannuelle, une corrélation forte et significative ($r_{\text{mean}} = 0.9$, $p < 0.01$) a été observée entre la série chronologique initiale et la série carbonisée, montrant ainsi que la variabilité isotopique du $\delta^{13}\text{C}$ a été préservée. Concernant le $\delta^{18}\text{O}$, les résultats peuvent être décrits comme un processus séquentiel en deux phases. La phase initiale, se produisant en dessous de 300 °C et caractérisée par une augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ jusqu'à +1,6 ‰ par rapport aux valeurs initiales, s'explique par la volatilisation et la dégradation préférentielle des composés thermolabiles. Cependant cette modification isotopique n'affecte pas la cellulose, composant moléculaire préférentiellement utilisé pour les reconstructions climatiques, qui conserve sa valeur $\delta^{18}\text{O}$ jusqu'à 300 °C. La deuxième phase, se produisant de 300 °C à 700 °C, consiste en une diminution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ avec l'augmentation de la température, jusqu'à ≈ -22 ‰ par rapport à la signature initiale. Cette baisse drastique du $\delta^{18}\text{O}$ est principalement due à la dégradation thermique de la cellulose et de la lignine. Ces résultats apportent une compréhension fondamentale des processus mis en jeu lors de la carbonisation et permettent de fixer des limites à l'utilisation de la composition isotopique du carbone et de l'oxygène des restes de bois torréfiés et carbonisés de la « forêt » de Notre-Dame de Paris, pour caractériser les conditions paléoenvironnementales dominant le Bassin parisien au Moyen Âge.

Affiliation des auteur.es

1 - Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement/IPSL, UMR CEA/CNRS/UVSQ/UPSaclay8212, L'Orme des Merisiers, Bât. 701, CEA Saclay, 91191 Gif/Yvette Cedex, France

2 - Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 55 avenue de Paris, 78035 Versailles Cedex

3 - Sorbonne Université, CNRS, EPHE, PSL, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, F-75005, Paris Cedex 05, France

4 - UMR 7209 — AASPE-CNRS/MNHN, CP56, 55 rue Buffon, 75005 Paris, France

Le brunissement des plombs de couverture de Notre-Dame de Paris : impact de l'environnement et tests de vieillissement en laboratoire

Auteur.es de la présentation :

CLÉMENT M.^{1,2}, EL MOUATS C.², AZÉMA A.¹, CHABAS A.², PETITMANGIN A.², BAYLE M.³, L'HÉRITIER M.⁴, SARAH G.⁵

Affiliation des auteur.es

- 1 - LRMH, CRC UAR3224, MNHN, Champs-Sur-Marne
- 2 - LISA, UPEC, Créteil
- 3 - A-Corros, Arles
- 4 - Université de Paris
- 8 - ArScan UMR7041, Saint-Denis
- 5 - Iramat-Centre Ernest Babelon — CNRS UMR5060, Orléans

RÉSUMÉ :

L'impact des changements climatiques sur les édifices patrimoniaux est au cœur de la préoccupation des acteurs de la conservation du patrimoine. Le plomb métal, qui recouvre ou orne de nombreux édifices prend depuis quelques dizaines d'années une teinte brune qui diffère sensiblement de l'aspect gris habituel de sa patine composée de sulfates et de carbonates de plomb. Ce brunissement est dû à la plattnérite, un dioxyde de plomb, dont le mécanisme de formation reste à élucider. La cathédrale Notre-Dame de Paris n'échappe pas au phénomène : en de moins de 10 ans, la couleur de la couverture du grand comble mais aussi des terrasses, des tours et de la sacristie se sont parées d'un camaïeu de bruns. Une multitude de paramètres est susceptible d'influencer le phénomène de brunissement. Dans un premier temps, l'impact de la composition élémentaire a été étudié. Les résultats des analyses élémentaires fines réalisées sur l'ensemble des tables de plomb de la sacristie par LA-ICP-MS ont révélé que la teneur en élément traces, en particulier l'étain (dès 0,3%), contribue à favoriser l'apparition du brunissement. En conséquence, l'emploi d'un plomb pur à 99,9% a été recommandé pour la coulée des nouvelles tables et décors.

En parallèle de la restauration en cours, des coupons de plomb coulés selon les recommandations sont soumis à 6 mois de tests de vieillissement dans une chambre climatique à l'intérieur de laquelle sont injectés différents polluants composant l'atmosphère actuelle. En effet, l'évolution significative de la concentration de certains polluants comme l'ozone (O_3), les oxydes d'azote (NO_x) en nette augmentation au cours de ces 30 dernières années ou au contraire comme le dioxyde de soufre dont la teneur a été divisée par 40 en 60 ans, est susceptible d'agir sur le mécanisme réactionnel de formation de la plattnérite. L'évolution de la surface des coupons vieillis en chambre est périodiquement caractérisée selon un protocole mettant en œuvre une batterie d'examens multi-échelle allant de la photographie aux analyses XPS, en passant par la colorimétrie, la microspectroscopie Raman, ou encore les microscopies optique et électronique. Les premiers résultats de cette étude, à 3 mois de vieillissement, seront présentés dans le poster proposé.

Le rayonnement de Notre-Dame : le portail de Notre-Dame de Longpont-sur-Orge. L'apport de la récente restauration.

Auteur.es de la présentation :

KASARSKA I. ¹, DUCHÊNE S. ², LEVY-HINSTIN J. ³, MEYOHAS M.-E. ⁴ :

RÉSUMÉ :

L'église de Longpont-sur-Orge située dans l'Essonne est une ancienne priorale clunisienne. Elle a été construite au début de XIII^e siècle, avec le soutien de Philippe Auguste. Le portail, dédié au Couronnement de la Vierge, présente un décor sculpté de 1235 environ et s'apparente au portail gauche de la façade occidentale de Notre-Dame de Paris : par son iconographie, par la construction « radiale » de ses voussures et par le raffinement de l'exécution de sa sculpture.

Le portail présente certaines irrégularités de montage : voussures décalées par rapport aux dais des ébrasements qui les reçoivent, clefs de voussures supplémentaires insérées au sommet, moulures de la voussure interne retaillées pour faire place aux ailes des anges du tympan. Nous y voyons les signes d'un démontage et d'une reconstruction effectués sous Charles VIII et Anne la Bretagne. Au même moment, la paroi de la façade occidentale dans laquelle s'inscrit le portail a été partiellement refaite pour ménager l'épaisseur nécessaire à la présentation de son effigie et de celle de son épouse ; cette reconstruction est ainsi datée entre 1491 et 1498.

L'enchaînement des constructions nous renseigne sur l'art de bâtir un portail sculpté en relation avec l'architecture de la façade et plus largement avec le bâtiment tout entier. L'étude de cette problématique à Longpont rentre en résonance directe avec celles de la construction des portails de Notre-Dame menées actuellement par le GT Décor.

La façade de Longpont a bénéficié d'une restauration complète en 2022 réalisée par Jean-Marc Pitet, architecte du patrimoine (agence ABDPA) : une consolidation du bâti, nettoyage des sculptures, remplacement des statues des ébrasements à leur hauteur initiale. Cette campagne nous a donné l'occasion de réaliser des analyses de la polychromie, complétées par les observations des couches de peinture et de leur rapport avec la pierre.

Affiliation des auteur.es

1 - Institut Catholique de Paris/UR « Religion, Culture et Société » (EA 7403) et Centre André Chastel (UMR8150)/Paris.

2 - Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH)/Centre de Recherche sur la Conservation UAR 3224 Ministère de la Culture CNRS MNHN/Pôle scientifique Peinture murale et polychromie/Champs-sur-Marne)

3 - Restauratrices de peintures et de sculptures polychromes.

Modélisation de la polychromie du portail central : le cas du Prophète

Auteur.es de la présentation :

FELTMAN J.¹, DUCHÊNE S.²

**Affiliation
des auteur.es**

67

RÉSUMÉ :

Ce projet utilise les données d'analyses physico-chimiques réalisées par le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) pour recréer numériquement l'apparence d'une polychromie multicouche. Depuis les années 1970, les ingénieurs du LRMH relèvent et analysent les traces de polychromie sur la sculpture en pierre de la façade ouest de Notre-Dame de Paris. Les rapports du LRMH, publiés au fil des années, révèlent que ces sculptures étaient autrefois peintes de couleurs vives, dans des teintes brillantes d'azurite, d'ocre rouge, de jaune et de vert, certaines parties étant même dorées. Les échantillons montrent également que les sculptures ont été peintes en plusieurs couches. Il est cependant difficile de les dater, les matériaux utilisés restant ubiquistes jusqu'au XVIII^e siècle.

Près de 100 échantillons de la façade ouest de Notre-Dame sont conservés par le LRMH. S. Duchêne a réanalysé ces échantillons, réalisant de nouvelles analyses élémentaires par MEB-EDS (microscopie électronique à balayage et spectroscopie à dispersion d'énergie) et en étudiant les pigments et les liants par spectroscopie FTIR (Infrarouge à Transformée de Fourier). Ces données sur la nature des matériaux de la couleur et leurs mises en œuvre sont utilisées pour développer une méthode afin de recréer l'aspect original de la polychromie des sculptures sur des modèles 3D. L'objectif est de mieux comprendre l'esthétique du portail gothique et de développer un moyen de représenter fidèlement la polychromie sous forme numérique.

Le montage de la polychromie étant réalisé en plusieurs couches, les restitutions numériques ne peuvent se baser uniquement sur la photographie des sculptures de la façade, car celles-ci ne rendent compte que de la couche visible en surface. D'autre part, les couleurs se dégradant au fil du temps, il n'est pas suffisant de fonder une restitution numérique entièrement sur des images de stratigraphie prises au microscope. Enfin, la technologie des modèles et de la peinture numériques ne reproduit pas fidèlement les sculptures en pierre calcaire peintes avec une véritable polychromie. Pour répondre à ces problématiques, notre approche combine des données artistiques, historiques et scientifiques, et implique des ingénieurs, des artistes, des historiens et des spécialistes en modélisation numérique. L'accent a été mis sur une zone de la façade pour laquelle il existe le plus grand nombre d'échantillons de polychromie : la sculpture d'un Prophète du portail du Jugement dernier. Un seul échantillon stratigraphique de la robe de ce prophète révèle une technique de peinture utilisant une première couche préparatoire au blanc de plomb, une seconde à l'ocre jaune, puis des couches picturales de noir de charbon et d'azurite. Grâce à l'analyse chimique des pigments et des liants, une restauratrice a recréé la polychromie en couches sur une plaquette de liais parisien. La photographie numérique de cette plaquette et un relevé photogrammétrique du portail central ont été utilisés pour créer le modèle numérique 3D.

1 - University of
Alabama/Tuscaloosa,
USA.

2 - Laboratoire de
Recherche des
Monuments Historiques
(LRMH)/Centre de
Recherche sur la
Conservation UAR
3224 Ministère de
la Culture CNRS
MNHN/Pôle scientifique
Peinture murale et
polychromie/Champs-sur-
Marne.

Étude de la polychromie de la Porte rouge : méthodes et découvertes

Auteur.es de la présentation :

DUCHÊNE S.¹, CLAVERIE T.¹, LEVY-HINSTIN J.², SANDRON D.³

Affiliation

des auteur.es

68

RÉSUMÉ :

Le chantier scientifique de la cathédrale a offert l'opportunité d'étudier plus en détail la technique de polychromie du décor monumental extérieur. Cet intérêt pour la matérialité de la couleur s'inscrit dans un projet de recherche mené au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH). Le projet vise à étudier les matériaux de la couleur (pigments, liants, décors métalliques), en reprenant des études antérieures, en réexploitant analytiquement des prélèvements anciens et en réalisant de nouveaux prélèvements et analyses là où cela est pertinent et possible. Le corpus d'étude se concentre sur les œuvres des XII^e et XIII^e siècles. Plus spécifiquement au sein de ce corpus, Notre-Dame de Paris tient une place particulière avec ses six portails qui ont tous fait l'objet d'une étude de polychromie. La synthèse transversale des résultats d'analyses permet d'identifier d'éventuelles pratiques similaires et la possibilité de transferts techniques entre les grands chantiers de décors monumentaux, révélant des liens de filiation.

La dernière étude, focalisée sur la Porte rouge qui a fait l'objet d'un relevé lasergrammétrique (Groupe Décor, Plemo 3D Grégory Chaumet), a été menée en février 2022. Ce portail de dimensions modestes permettait aux chanoines qui résidaient à proximité d'accéder directement au chœur de la cathédrale où ils se rassemblaient quotidiennement pour la célébration des offices. Le tympan est orné au centre de la scène du Couronnement de la Vierge par le Christ au paradis. Cette scène qui célèbre la patronne de la cathédrale est encadrée par les figures d'un couple royal, très vraisemblablement saint Louis et Marguerite de Provence, contemporains de l'exécution du portail dans les années 1260.

L'accès au tympan a permis de documenter la polychromie extrêmement fragile et parcellaire encore présente. Dix prélèvements ont été analysés en laboratoire, révélant l'usage de pigments et techniques spécifiques pour la polychromie. Une couche à l'ocre jaune est utilisée comme préparation de la pierre, tandis que les couches de couleurs sont réalisées à partir de pigments tels que l'outremer, l'azurite, le vermillon, le vert de cuivre et le blanc de plomb. Nous avons également été constaté que certaines parties des vêtements étaient ornées de feuilles d'or. Ces analyses ont confirmé que le portail était peint, probablement dès son origine, et ont permis d'établir la palette de couleurs et pigments utilisés sur le tympan et la voussure.

1 - Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH)/Centre de Recherche sur la Conservation UAR 3224 Ministère de la Culture CNRS MNHN/Pôle scientifique Peinture murale et polychromie/Champs-sur-Marne.

2 - restauratrice indépendante - enseignante honoraire Institut national du Patrimoine, Aubervilliers.

3 - Professeur d'Histoire de l'art du Moyen Âge, Sorbonne Université, Faculté des Lettres, Centre André Chastel UMR 8150, plateforme Plemo 3D.

«L'acoustique de Notre-Dame : hier et aujourd'hui» - Évolution de son acoustique, étude orgue, étude Mays, étude polyphonie.

Auteur.es de la présentation :

KATZ B. FG¹, MULLINS S. S.¹, LE PAGE V.¹, CANFIELD-DAFILOU E. K.¹, D'ALESSANDRO C.¹, BILLIET F.²

RÉSUMÉ :

L'acoustique d'un lieu, tout comme ses ambiances sonores, forment un objet impalpable, intangible qui résulte de caractéristiques spécifiques - le bâti, tangible, mais également de tout un ensemble de caractéristiques moins palpables. Cette acoustique évolue au fil des temps, en fonction des transformations architecturales, mobilières et rituelles. La prise en compte de l'ensemble de ces éléments permet de mieux cerner et comprendre comment sonnait et résonnait la cathédrale, aux différentes étapes clés de sa vie.

Le modèle numérique créé est un outil d'aide à la prise de décision — notamment en évaluant l'impact des éléments proposés dans le processus de restauration, mais aussi celui sur la sonorité de l'orgue des chœurs, etc... Il sert de « matrice » permettant de remonter le temps et ainsi permettre l'évolution de l'acoustique de Notre-Dame au fil des siècles, notamment en repositionnant des éléments architecturaux disparus et permettre l'exécution d'œuvre dans des conditions acoustiques très similaires à celles des époques visées.

Affiliation des auteur.es

1 - Institut Jean Le
Rond d'Alembert/URM
7190/Paris

2 - Maison des
Sciences de l'Homme
de Lyon Saint-
Etienne/UAR2000/Lyon

«Écouter Notre-Dame à travers les siècles.» Études autour des paysages sonores

A la Recherche de Notre-Dame, et Notre-Dame Whispers.

Auteur.es de la présentation :

PARDOEN M.¹, DE MUYNKE J.², GUESNEY M.¹, CROS C.³, PEICHERT S.⁴, KATZ B. FG²

Affiliation des auteur.es

1 - Institut Jean Le
Rond d'Alembert/URM
7190/Paris

2 - Maison des
Sciences de l'Homme
de Lyon Saint-
Etienne/UAR2000/Lyon

3 - Narrative

4 - Talkartive

RÉSUMÉ :

Une étude a été menée afin de connaître les paysages sonores de Notre-Dame à différentes étapes clés de la construction et de l'évolution de Notre-Dame. Fruit d'une collaboration intense entre les équipes scientifiques et des partenaires issus du monde socio-économique, des outils de médiations ont été développés.

Outre la restitution de fresques sonores (travail purement scientifique, fruit des résultats des équipes de la Maison des sciences de l'Homme de Lyon Saint-Etienne et de celles de l'Institut Jean le Rond d'Alembert), une fiction sonore en binaural, « A la recherche de Notre-Dame », a été produite et est diffusée gratuitement chez Audible. Elle retrace les étapes de la création du roman de Victor Hugo : « Notre-Dame de Paris ».

Notre-Dame Whispers est un projet de médiation culturelle et scientifique qui vise à promouvoir les recherches sur l'identité sonore de la cathédrale Notre-Dame de Paris à travers les siècles, menés par les scientifiques du groupe PHEND «The Past Has Ears at Notre-Dame». En partenariat avec Sorbonne Université, le CNRS et le groupe de travail acoustique du chantier scientifique Notre-Dame et avec le soutien de Collegium Musicae, DIM PAMIR, et OPUS. L'application Ekko of Notre-Dame est téléchargeable gratuitement sur Google Play et Apple Store en français, anglais et prochainement en espagnol.

En partenariat avec



www.miti.cnrs.fr

