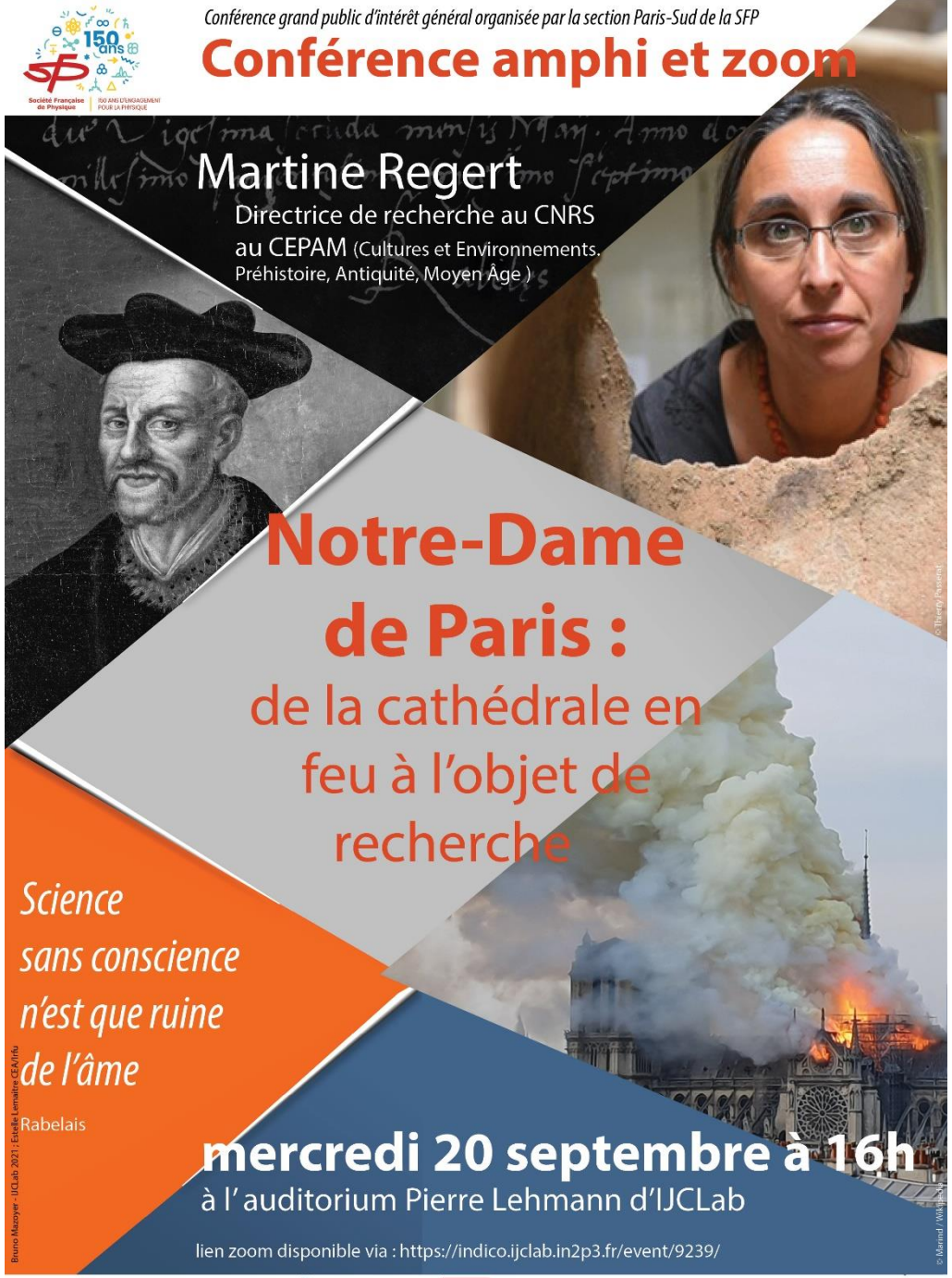
Société Française de Physique | 150 ANS D'ENGAGEMENT POUR LA PHYSIQUE

Conférence grand public d'intérêt général organisée par la section Paris-Sud de la SFP

Conférence amphi et zoom



cnrs | université PARIS-SACLAY FACULTÉ DES SCIENCES D'ORSAY | cea irfu | IJCLab Irène Joliot-Curie | université PARIS-SACLAY

Notre-Dame de Paris
de la cathédrale en feu à l'objet de recherche

Martine Regert - CNRS

en collaboration avec

Philippe Dillmann, Aline Magnien, Pascal Liévaux

et les groupes de travail du chantier scientifique

MINISTÈRE DE LA CULTURE

Liberté
Égalité
Fraternité

Points abordés

Retour sur l'incendie : du choc à la mobilisation

Des débris aux vestiges

Chantier et enjeux scientifiques

Des matériaux pour des techniques de construction innovantes

Le bois des charpentes : un biomatériau riche d'informations

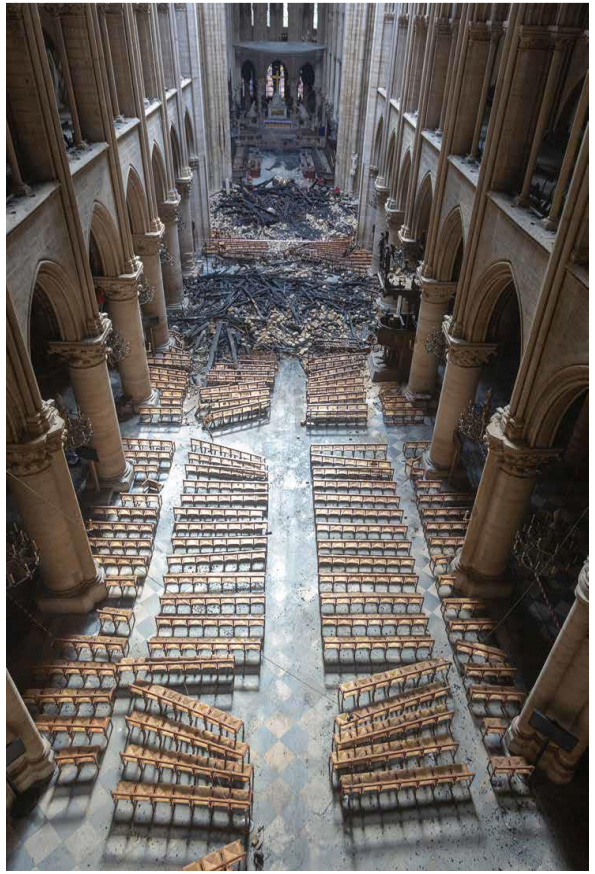
Les aspects immatériels : acoustique, émotion patrimoniale et numérique

Source de la photo : https://www.cnews.fr/france/2020-04-15/incendie-de-notre-dame-de-paris-un-apres-revivez-la-soiree-minute-par-minute

Du 15 au 16 avril 2019

15 avril 2019

18:55 Alerte incendie à Notre-Dame
19:26 Choeur et transept
19:54 Chute de la flèche
20:00 Nef
21:00 Tour nord



16 avril 2019

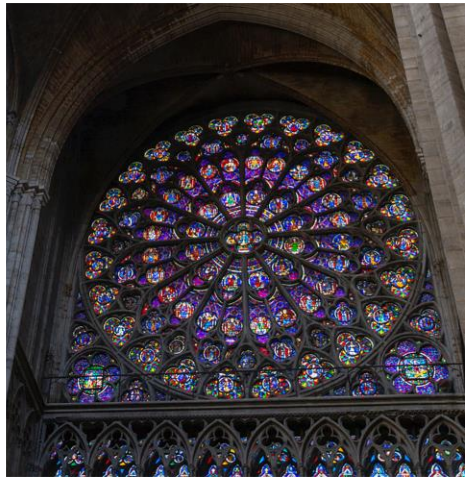
4:00 Fin de l'incendie

Le choc de la cathédrale en feu

Les charpentes et la flèche en feu

Des voûtes effondrées

Les vitraux protégés



Une sidération à l'échelle mondiale

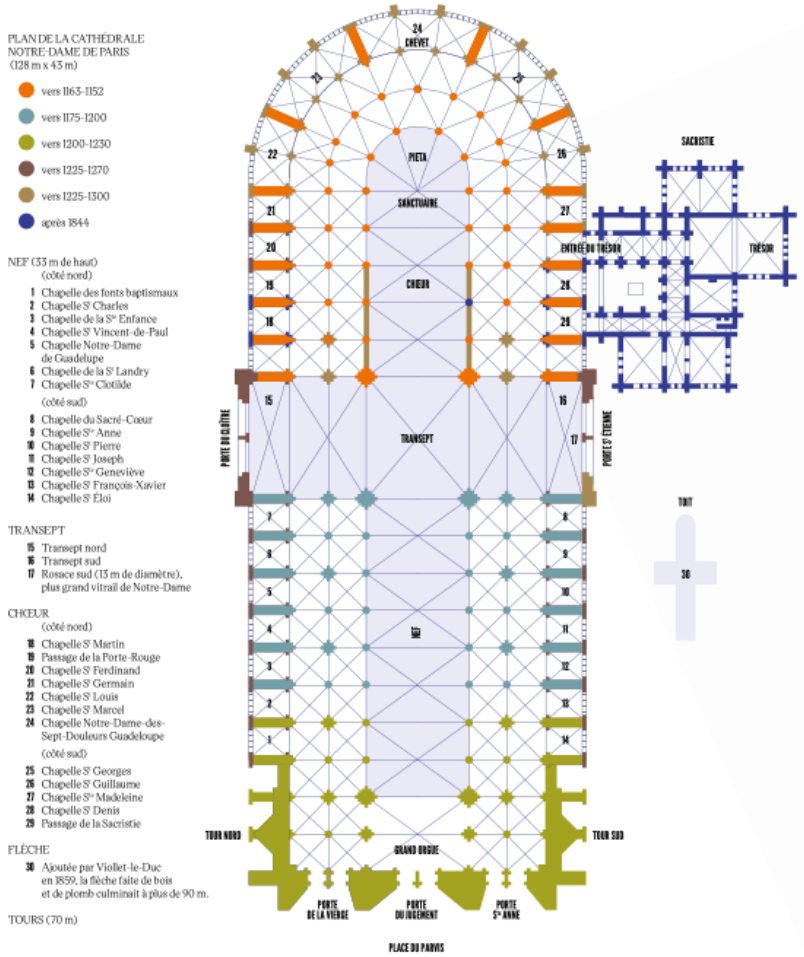
Le sauvetage dans l'urgence

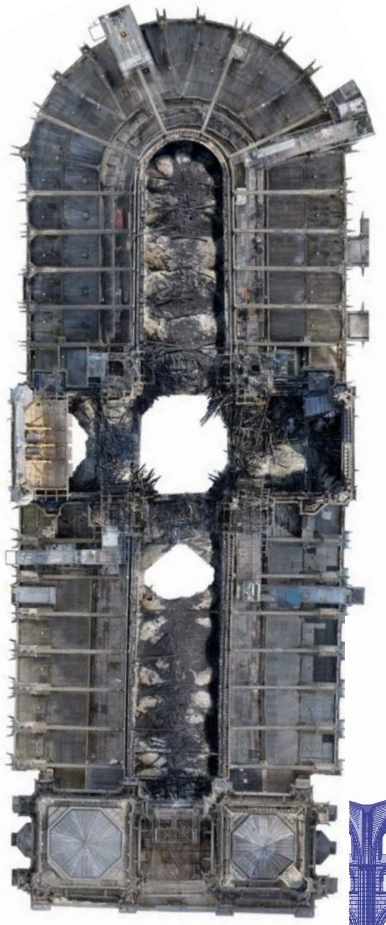
Maîtriser le feu

https://www.pompiers.fr/actualites/incendie-de-notre-dame-de-paris-un-impossible-operationnel

Evacuer les œuvres

Quelques éléments sur la cathédrale





- Construction entre 1160 et 1250
- Restauration supervisée par Eugène Viollet-le-Duc au 19e siècle
- 125 m long
- 33 m hauteur (voûtes)

Sens Laon Paris Chartres Reims Amiens Cologne

Portrait par Nadar

Eugène Viollet-le-Duc

Architecte français (1814 – 1879)

Historien de l'art.

Il devient **restaurateur**.

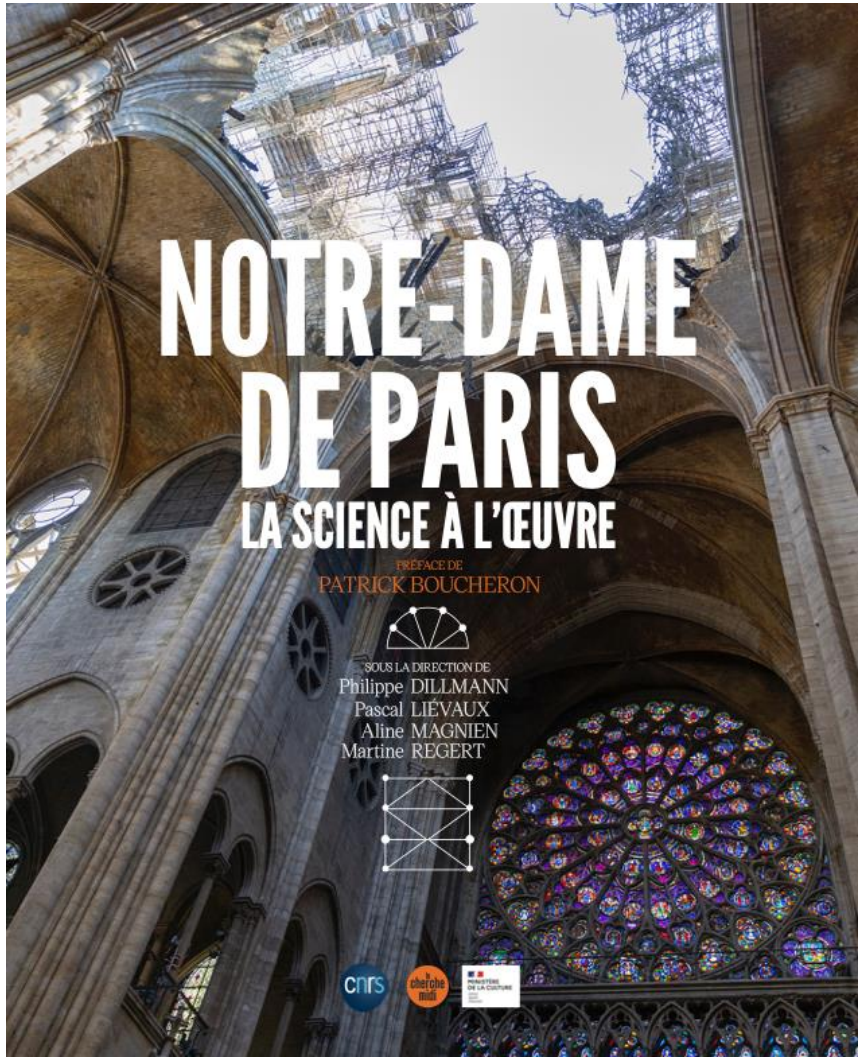
La pratique de la restauration est, à ses yeux, assez proche de la création.

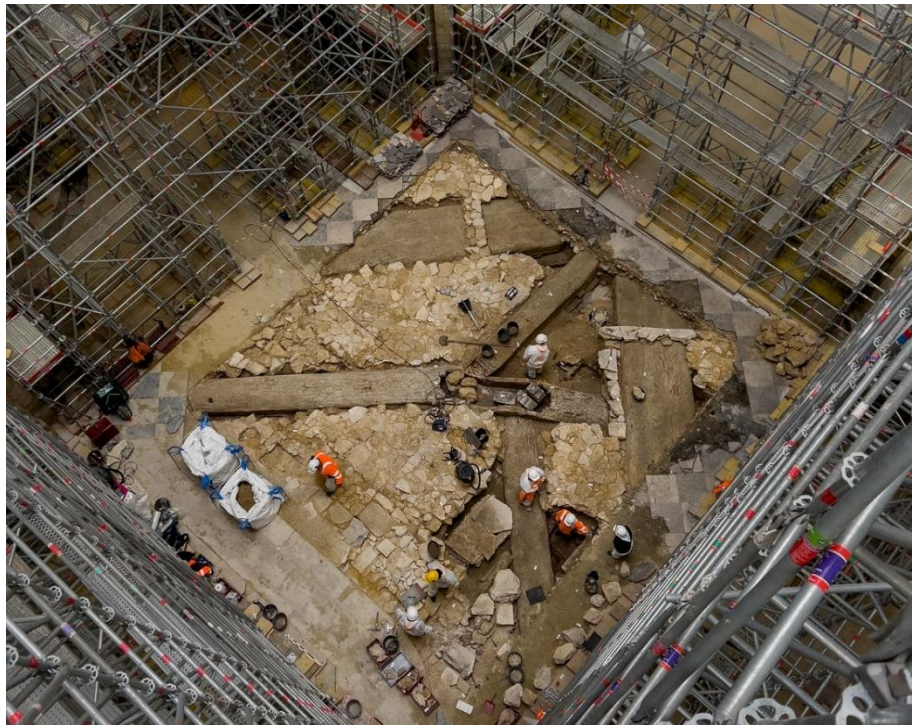
Eugène Viollet-le-Duc est **chargé de la restauration de Notre-Dame de Paris en 1843** aux côtés de Jean-Baptiste Lassus.

De l'émotion à la mobilisation scientifique

« Nous voici donc face au paradoxe ordinaire de la connaissance archéologique : il ne peut y avoir de savoir sans destruction. »

Patrick Boucheron
Professeur au Collège de France





Vue générale de la fouille depuis les échafaudages.
© Denis Gliksman, Inrap

https://www.inrap.fr/fin-des-fouilles-la-croisee-du-transept-de-la-cathedrale-notre-dame-de-paris-un-16452

De l'émotion à la mobilisation scientifique

Mobilisation des **laboratoires du ministère de la Culture**

du **SRA** Service Régional de l'Archéologie

et de l'**Inrap** Institut national de recherches archéologiques préventives

Quelques jours après le sinistre, création de :

ASSOCIATION DES SCIENTIFIQUES AU SERVICE DE LA RESTAURATION DE NOTRE-DAME DE PARIS

A partir de mai 2019, mise en place du **« Chantier scientifique Notre-Dame de Paris »** rassemblant près de **200 scientifiques** œuvrant dans **50 laboratoires** de plusieurs institutions.

Le projet de restauration

Architectes en chef des Monuments Historiques

Ph. Villeneuve, P. Prunet, R. Fromont

Création d'un établissement public

Maîtrise d'ouvrage

Général Georgelin
Philippe Jost

Établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris

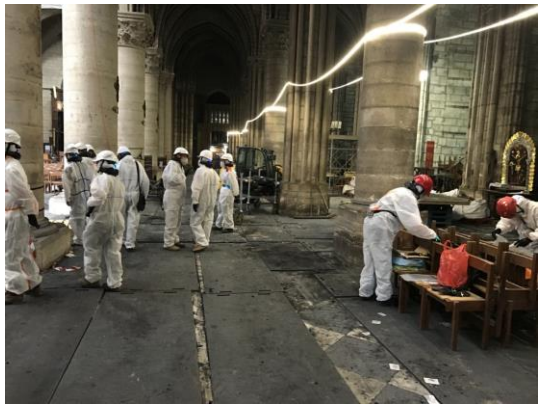
Établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Commission nationale du patrimoine et de l'architecture

- Choix de restauration « à l'identique »
- Flèche de Viollet-le-Duc (19e siècle)
- Charpente en bois (savoir-faire médiévaux)
- Le défi des voûtes

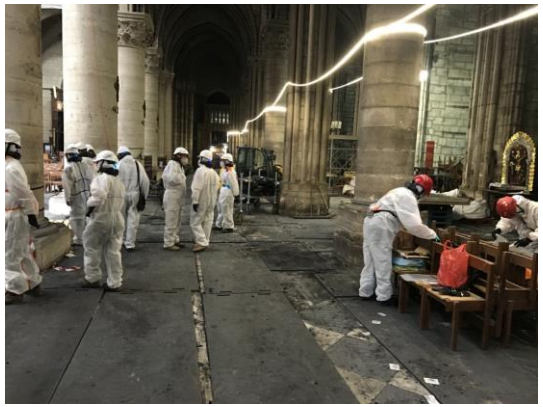
Des débris aux vestiges

Collecter – Inventorier – Trier



Des débris aux vestiges

Collecter – Inventorier - Trier



Toutes les pièces ont été précisément situées dans la cathédrale par photogrammétrie de haute précision.

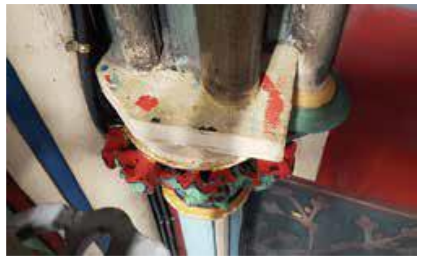
Un inventaire minutieux et complet a été entrepris.

Un local de stockage dédié en banlieue parisienne.

Enjeux scientifiques : des archives de l'humanité

Notre-Dame et sa matérialité…

- Conservation et restauration
- Altérations
- Techniques, provenance, savoir-faire
- Environnements et climats
- Chronologies

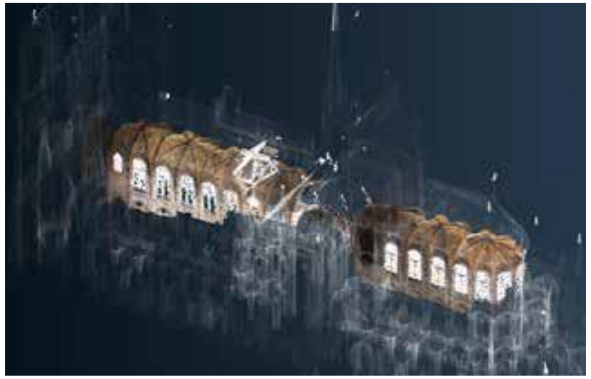


… sans oublier l'immatériel…

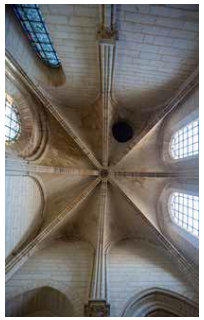
Acoustique et archéologie des paysages sonores

Emotion patrimoniale

… et le numérique



Dans le contexte culturel et environnemental médiéval



Prouesses des bâtisseurs médiévaux : ce que l'incendie a révélé

Du fait des trous dans certaines voûtes, on s'est aperçu que les voûtes médiévales étaient d'une grande minceur (Yves Gallet, responsable du GT Pierre) : **12-15 cm d'épaisseur** pour une hauteur sous voûte de 33 m.

Quid des cathédrales plus anciennes ?

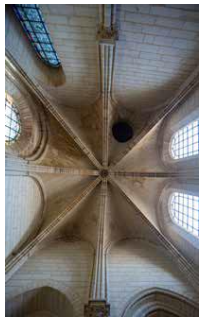
=> Campagnes de mesure (géoradar et scan 3D) à **Sens**

Cathédrale Saint-Etienne de Sens réalisée à partir de 1135-1140 (hauteur sous voûte 24 m)

Première cathédrale où des voûtes d'ogives sont construites

Des voûtes construites avec des blocs de **30 à 35 cm d'épaisseur**, soit le double qu'à Notre-Dame

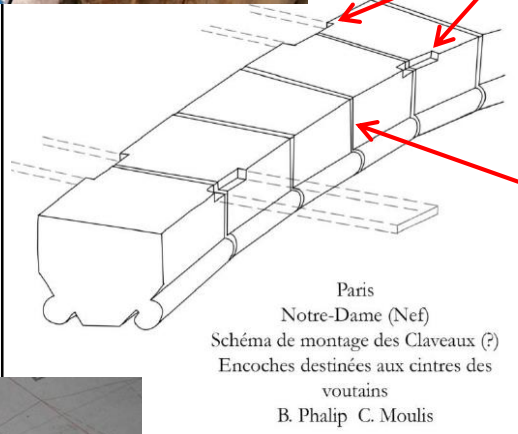
Source des images : ARTE – Notre-Dame de Paris, le chantier du siècle 1/3.



Prouesses des bâtisseurs médiévaux : ce que l'incendie a révélé

Les mortiers : des joints entre les pierres

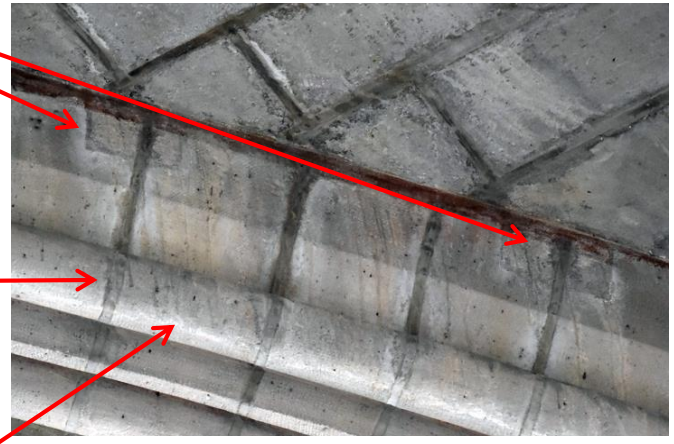
Carotte (20 mm de diamètre)



Encoches

Joints

Claveaux

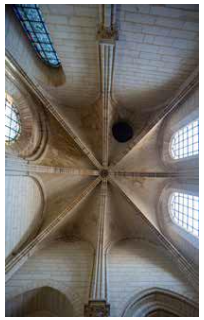


J.-M. Mechling *et al.*

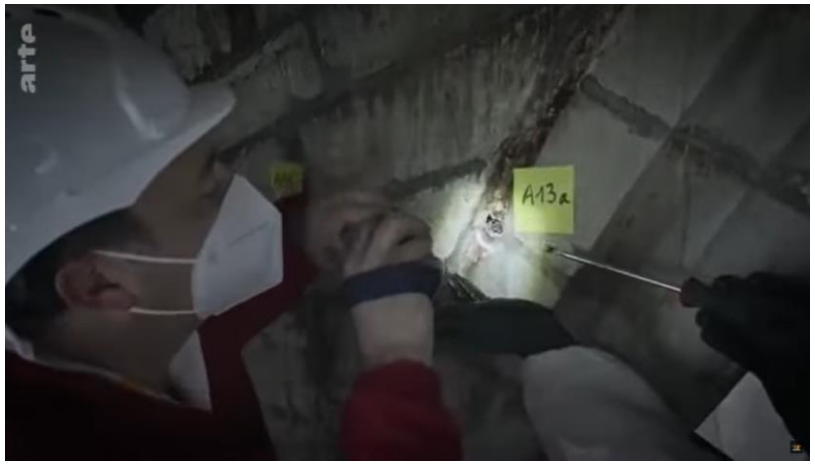
Team 207 « Materials for Civil Engineering »

INSTITUT JEAN LAMOUR

Source des informations : groupe de travail « Pierre » dirigé par Yves Gallet



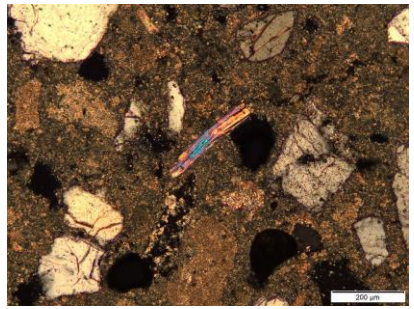
Prouesses des bâtisseurs médiévaux : ce que l'incendie a révélé



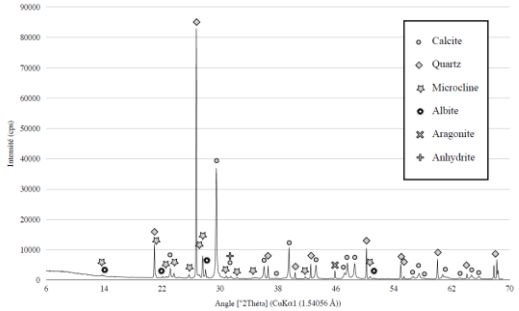
Accès aux **mortiers** (mélange utilisé pour assembler les pierres entre elles) : observation directe au niveau des voûtes et possibilités de carottage.

=> Caractérisation des mortiers par des approches complémentaires :

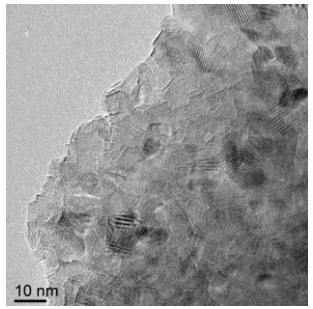
Pétrographie

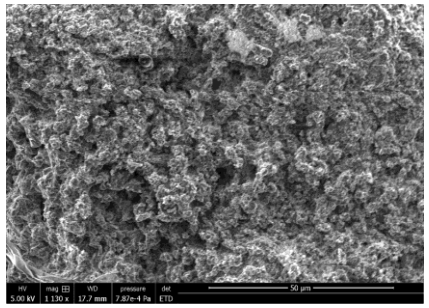


DRX

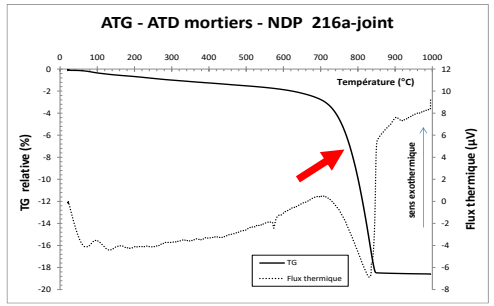


Microscopies électroniques





Analyses thermiques

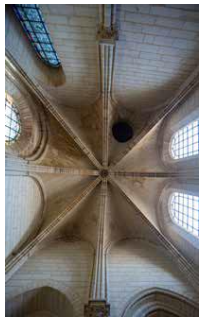


Résultats Grande régularité des mortiers

Des mortiers fabriqués à partir de **chaux** mélangée avec du **sable**

Des **mélanges très constants** tant dans les proportions chaux / sable qu'au niveau de la qualité du sable

Source image du haut : ARTE – Notre-Dame de Paris, le chantier du siècle + GT « Pierre » dirigé par Yves Gallet



Prouesses des bâtisseurs médiévaux : ce que l'incendie a révélé

Au sommet des murs, à plus de 30 m de haut, une série d'agrafes en fer a été découverte. Elles étaient invisibles avant l'incendie dans la mesure où la charpente en bois reposait sur ces murs.

A l'heure actuelle, ce sont plusieurs centaines d'agrafes qui ont été mises au jour, sur les murs...

… mais aussi à l'intérieur de colonnes …

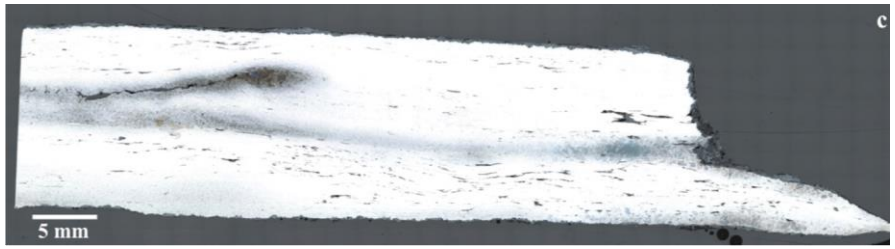
… ou encore au niveau des tribunes du chœur

L'Héritier *et al.*, 2023, Notre-Dame de Paris: *The First Iron Lady? Plos ONE*

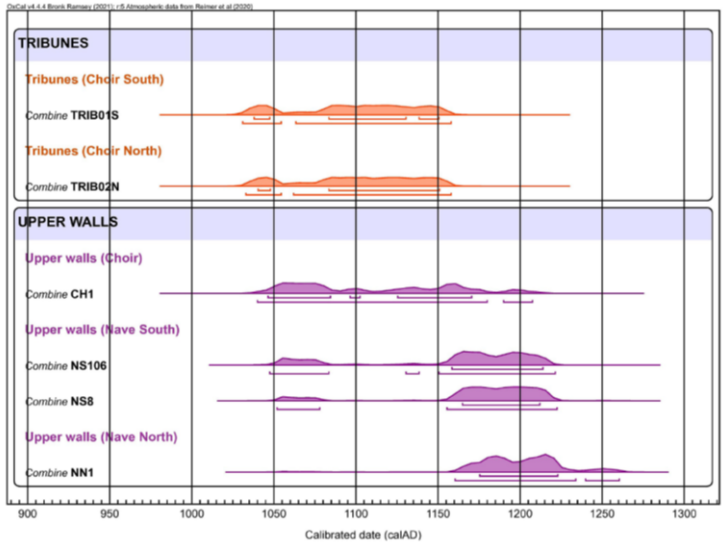
De quand date le fer ?

Quand les agrafes ont-elles été installées ?

Ont-elles été intégrées dès les débuts de la construction et faisaient-elles partie du projet architectural initial médiéval ou ont-elles été ajoutées après pour renforcer le monument lors d'une des phases de restauration ?



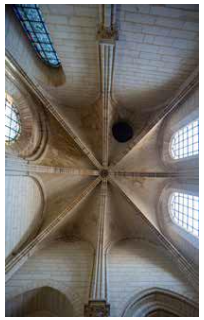
L'observation de coupes métallographiques permet de révéler les zones aciérées qui contiennent du carbone que l'on sait extraire et qui peut être daté par la méthode du carbone 14.



Les agrafes des tribunes ne sont pas postérieures à 1160 et ont donc été intégrées à l'architecture dans les premières phases de la construction.

Celles des hauts murs remontent à 1200-1220, ce qui est en cohérence parfaite avec la datation de la charpente à 1215.

L'Héritier *et al.*, 2023, Notre-Dame de Paris: *The First Iron Lady*? *Plos ONE* et L'Héritier et al., 2023, *Journal of Cultural Heritage*



Prouesses des bâtisseurs médiévaux : ce que l'incendie a révélé

Au sommet des murs, à plus de 30 m de haut, une série d'agrafes en fer a été découverte. Elles étaient invisibles avant l'incendie dans la mesure où la charpente en bois reposait sur ces murs.

A l'heure actuelle, ce sont plusieurs centaines d'agrafes qui ont été mises au jour, sur les murs…

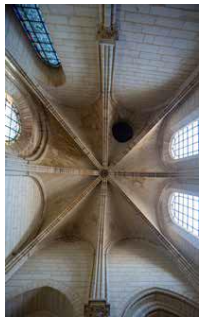
… mais aussi à l'intérieur de colonnes …

… ou encore au niveau des tribunes du chœur

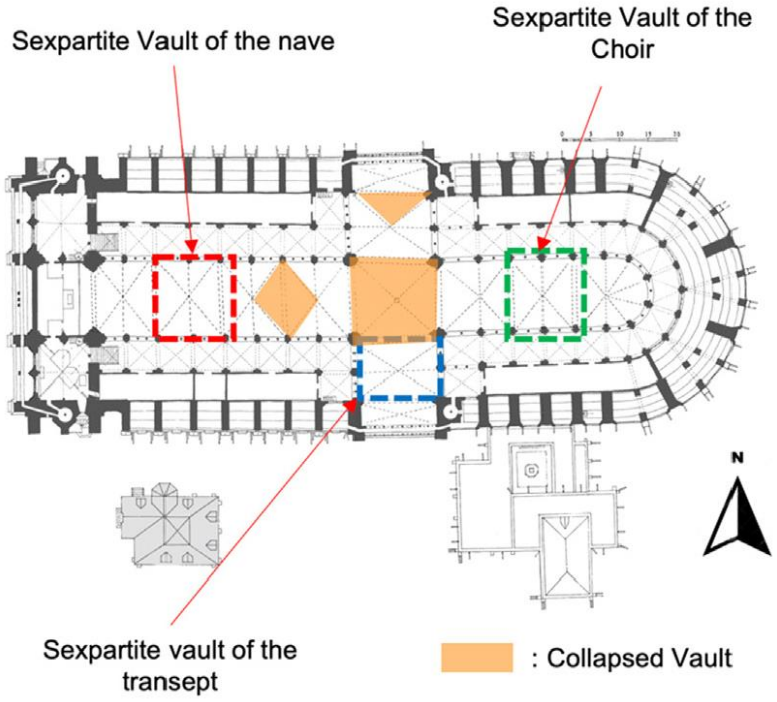
« *The First Iron Lady* » présentait donc un véritable « squelette de métal ».

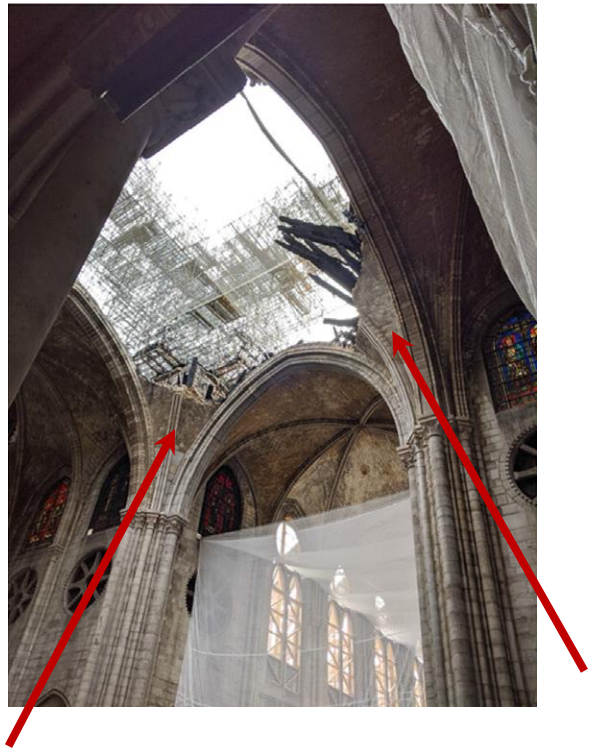
=> Découverte inattendue pour une cathédrale de la 2nde moitié du 12ème siècle, alors que jusqu'alors l'usage du métal était bien connu dans des cathédrales gothiques mais à partir du 13ème siècle (cf. Bourges et Chartres)

L'Héritier *et al.*, 2023, Notre-Dame de Paris: *The First Iron Lady? Plos ONE*

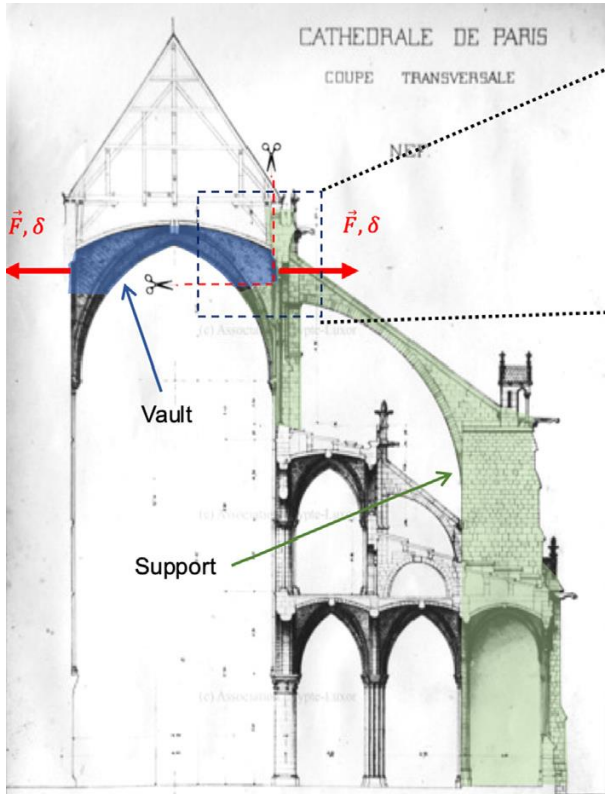


Prouesses des bâtisseurs médiévaux : ce que l'incendie a révélé





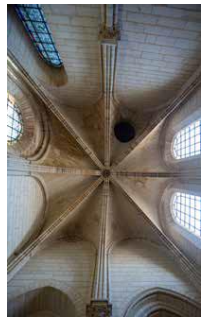
Les parties basses des voûtes (tas de charge) sont restées en place.



Arcs-boutants alignés sur les tas de charge => limite des dégâts

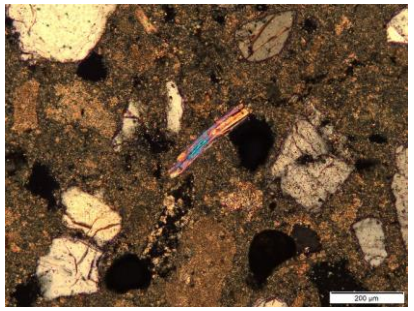
Stéphane Morel, responsable du GT Structure : « Une grande partie de ce que l'on pense être la voûte fait en réalité partie des murs. Il en résulte que la voûte, au sens structurel du terme s'en trouve ainsi diminuée. »

Parent *et al.*, 2023, A multi-model structural analysis of the vaults of Notre-Dame de Paris Cathedral after the 2019 fire and a proposal for a hybrid model merging continuum and discrete approaches. *Journal of Cultural Heritage*.



Notre-Dame de Paris au coeur d'innovations architecturales

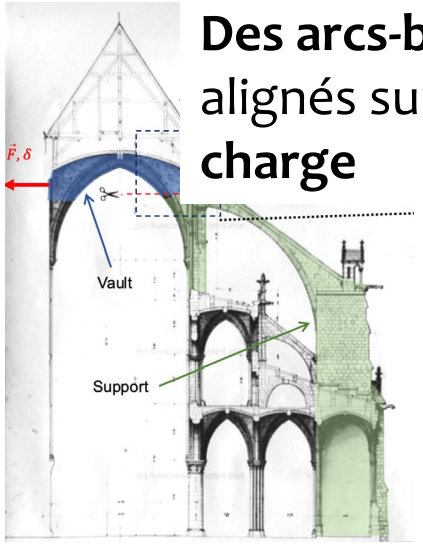
Des mortiers de chaux d'une grande régularité à base de mélanges constants, comme joints entre les pierres, assurant la souplesse de l'édifice



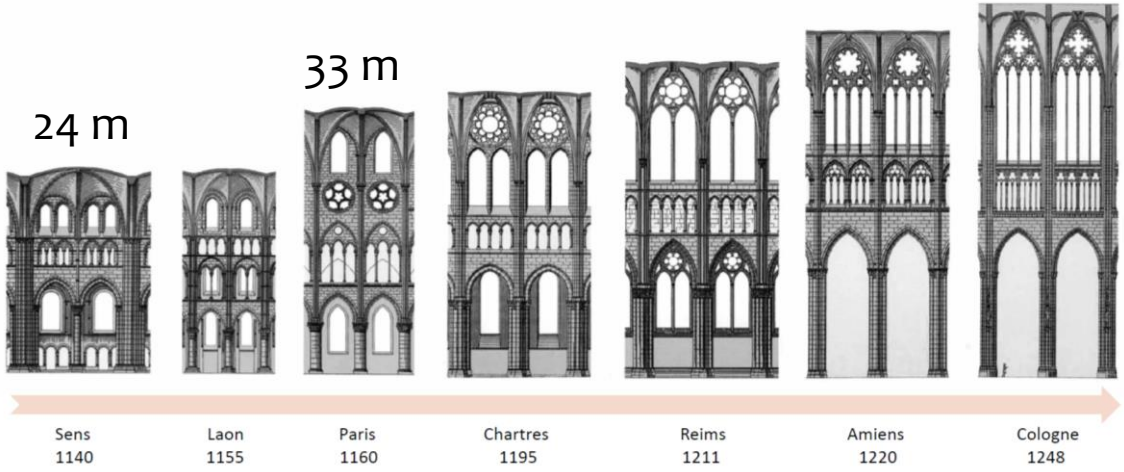
Un véritable squelette de fer

Tout est en place pour la **quête de la hauteur :** plus haut, plus large, plus fin (M. L'Héritier)

Toujours plus de lumière, toujours moins de matière (P. Prunet)



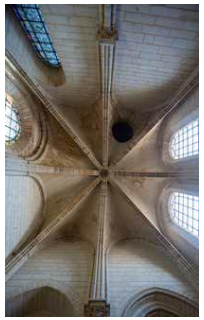
Des arcs-boutants alignés sur les **tas de charge**



Source : ANR ALTIOR, dir. Yves Gallet, d'après G. Binding, 1993

Saint-Pierre de Beauvais (48 m)

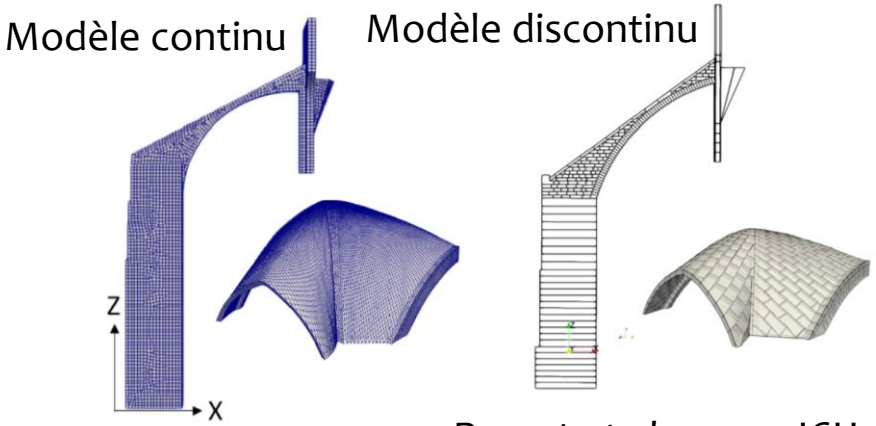
Source image de gauche: ARTE – Notre-Dame de Paris, le chantier du siècle 1/3.



Des innovations architecturales encore mal comprises

ANR DEMMEFI (dir. Thomas Parent)

Évaluation structurale post-incendie des Monuments Historiques, vers une utilisation optimisée de la MEF et de la MED



Parent *et al.*, 2023, JCH

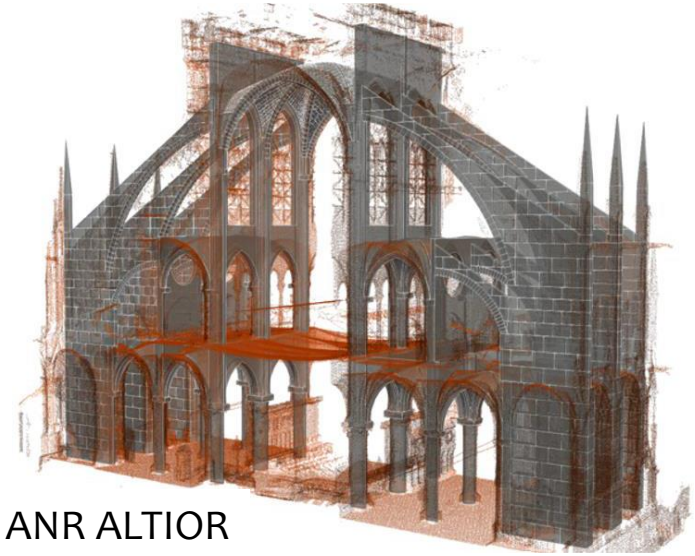
OBJECTIFS

Déterminer le comportement mécanique de la maçonnerie de Notre-Dame de Paris

Développer un nouvel outil de calcul dédié aux monuments en maçonnerie historique

ANR ALTIOR (dir. Yves Gallet)

Les voûtes de Notre-Dame de Paris et la quête de la hauteur dans l'architecture gothique en France, XIIe-XIIIe siècles



ANR ALTIOR
modèle géométrique d'une travée du chevet de Notre-Dame de Paris (© Stono/M. Bagnéris et F. Cherblanc)

Comprendre la conquête de la hauteur dans l'architecture gothique en France aux XIIe-XIIIe siècles

Les vitraux : les miraculés de l'incendie

Rappel historique

Seules les 3 roses (ouest, nord et sud) sont médiévales (13e siècle).

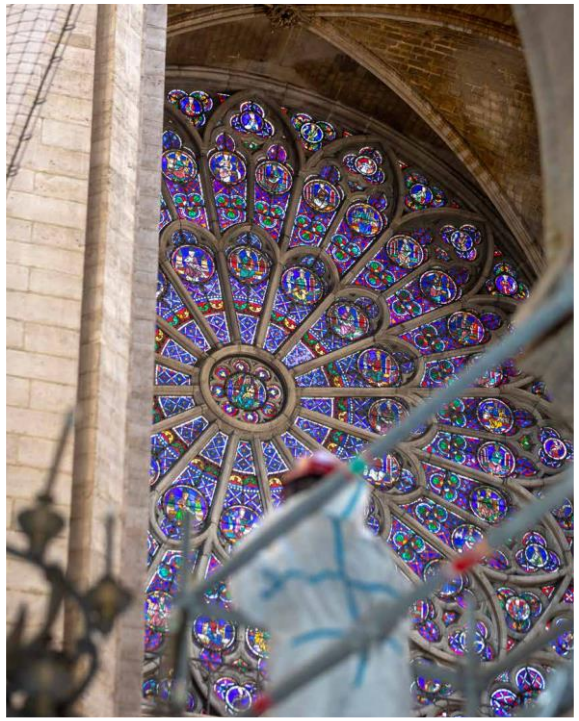
Plusieurs restaurations ultérieures (16e, 18e et 19e siècles).

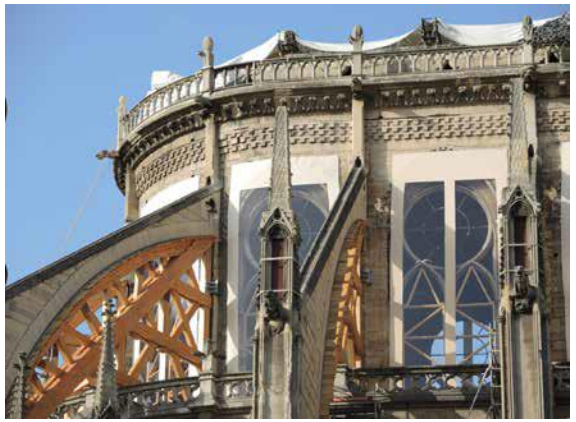
Re-création complète des vitraux dans un style médiéval par Viollet-le-Duc et Lassus lors de la restauration du 19e siècle.

Les vitraux ont été épargnés par l'incendie : rôle de bouclier des voûtes et du travail des pompiers.

La plupart des vitraux ont été déposés après l'incendie.

Néanmoins une pollution superficielle s'est formée.



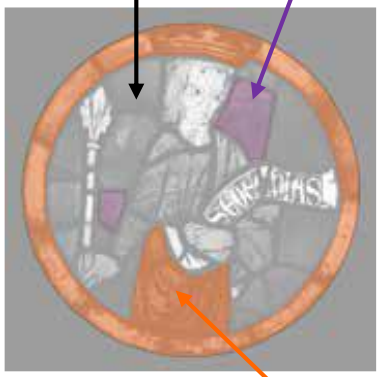


Source des informations : groupe de travail « Verre » dirigé par Claudine Loisel

Les vitraux : les miraculés de l'incendie

Contenu des recherches

- Constat d'état après dépose
- Caractérisation des dépôts de surface en vue de la mise au point d'un protocole de nettoyage
- Critique d'authenticité
- Travail en archives
- Caractérisation des verres

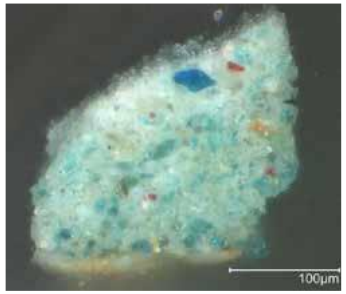


=> Vers une meilleure « connaissance de la qualité des matériaux, des lieux de production, des ateliers des peintres-verriers ayant œuvré pour Notre-Dame. »

Source des informations : groupe de travail « Verre » dirigé par Claudine Loisel

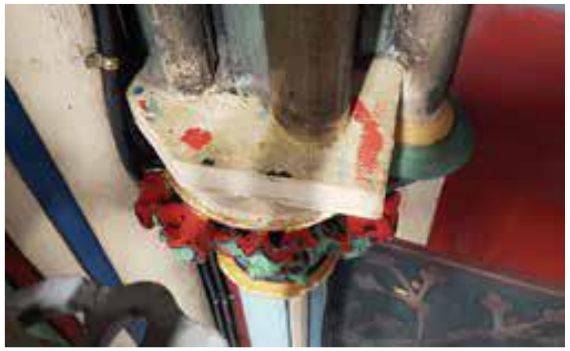
Les couleurs retrouvées de la cathédrale

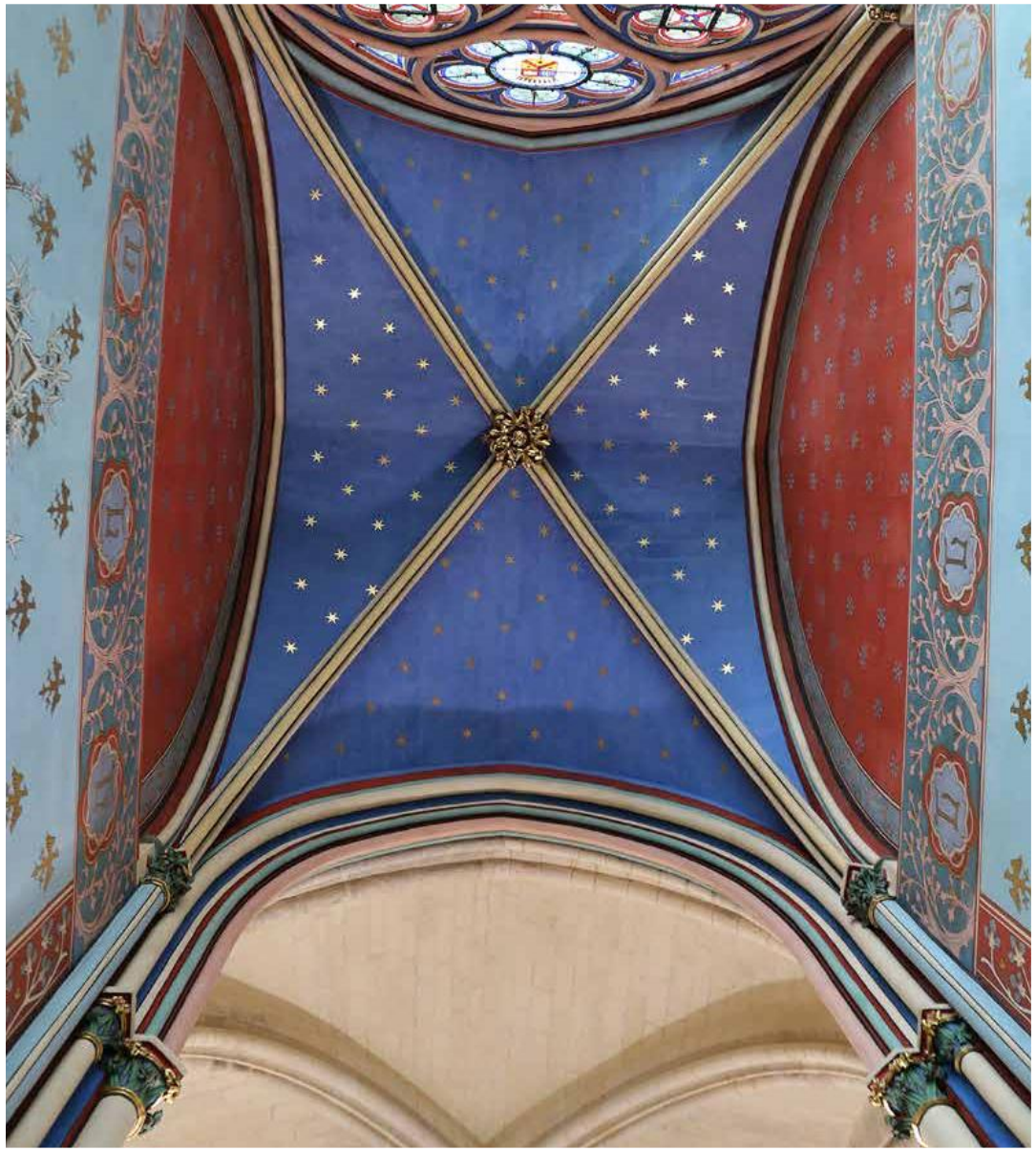
« Le drame du 15 avril 2019 a ouvert un champ d'investigation que nous n'imaginions pas : la possibilité d'un nettoyage intégral de l'intérieur de la cathédrale. »



Techniques picturales : nature des pigments, préparation des enduits, etc.

Evolution de ces techniques du Moyen Âge au 19e siècle.

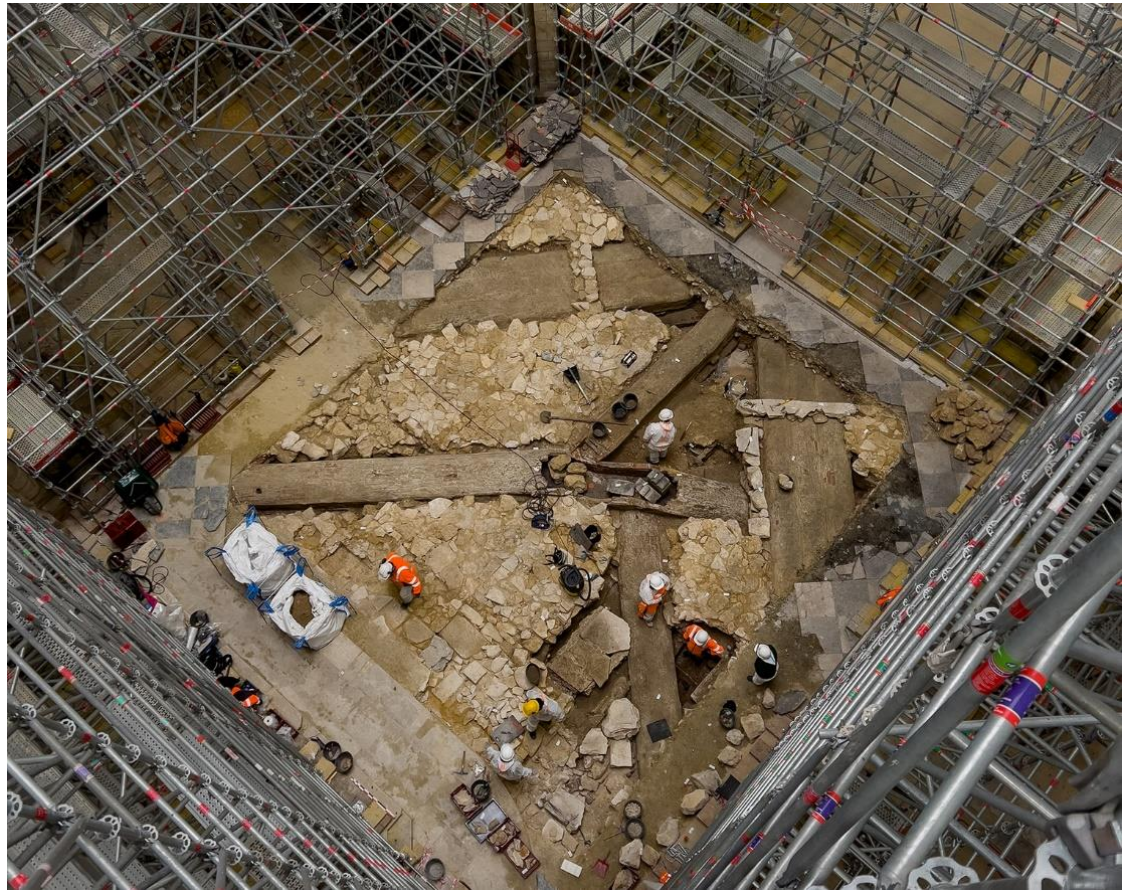




Chapelle Saint-Ferdinand après restauration complète en 2020

Source des informations : groupe de travail « Décor » dirigé par Dany Sandron

Les découvertes archéologiques de l'Inrap



Vue générale de la fouille depuis les échafaudages. © Denis Gliksman, Inrap

https://www.inrap.fr/fin-des-fouilles-la-croisee-du-transept-de-la-cathedrale-notre-dame-de-paris-un-16452

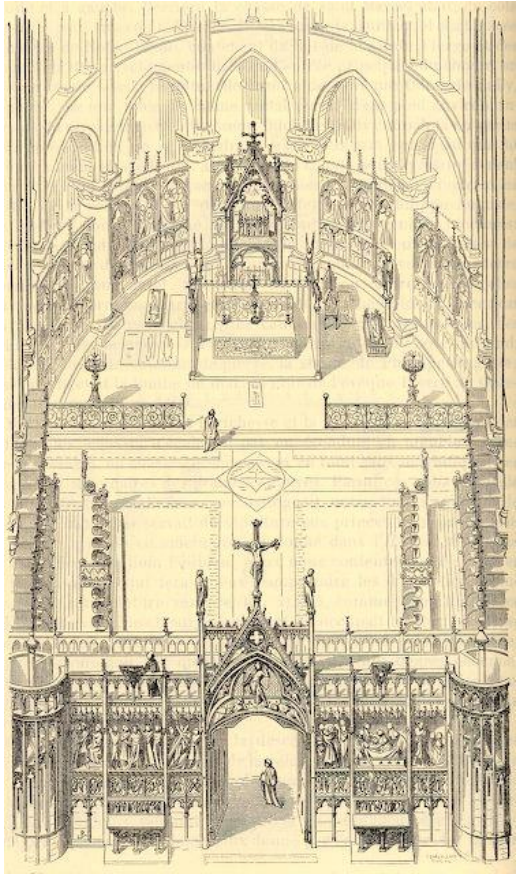
Source des informations : Inrap

Les découvertes archéologiques de l'Inrap

Le chœur de Notre-Dame avec le jubé au 1er plan vers 1250 (dessin Viollet-le-Duc)

Les vestiges du Jubé médiéval

Photos © Denis Gliksman, Inrap



https://www.inrap.fr/fin-des-fouilles-la-croisee-du-transept-de-la-cathedrale-notre-dame-de-paris-un-16452

https://www.pinterest.fr/pin/555490935278801610/

Bois des charpentes : un biomatériau riche d'informations

« La « forêt » de Notre-Dame, consumée par les flammes, était l'une des plus grandes charpentes de cathédrale gothique parvenue jusqu'à nous. »

Charpente - un mikado de milliers de bois plus ou moins carbonisés

Bois carbonisés de la charpente Notre-Dame de Paris après l'incendie en 2019. © Alexa Dufraisse

- Inventaire (10 000 pièces de bois brûlés)
- Localisation dans l'espace
- Enregistrement
- Evacuation
- Stockage et conservation

Matériaux non réutilisables ⟹ objets de recherche

https://theconversation.com/dossier-les-sciences-au-service-de-notre-dame-de-paris-188755

Bois des charpentes : un biomatériau riche d'informations

Des charpentes

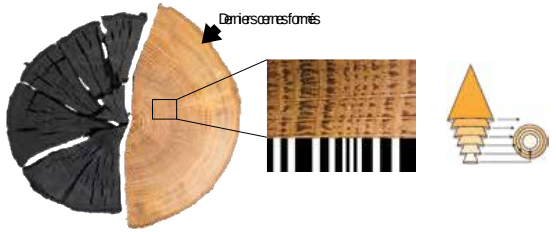
Des forêts

Techniques
Savoir-faire

Provenance

Trous de flottage, entrait, 13e s.
O. Girardclos, J.-Y. Hunot

Environnements
Climats

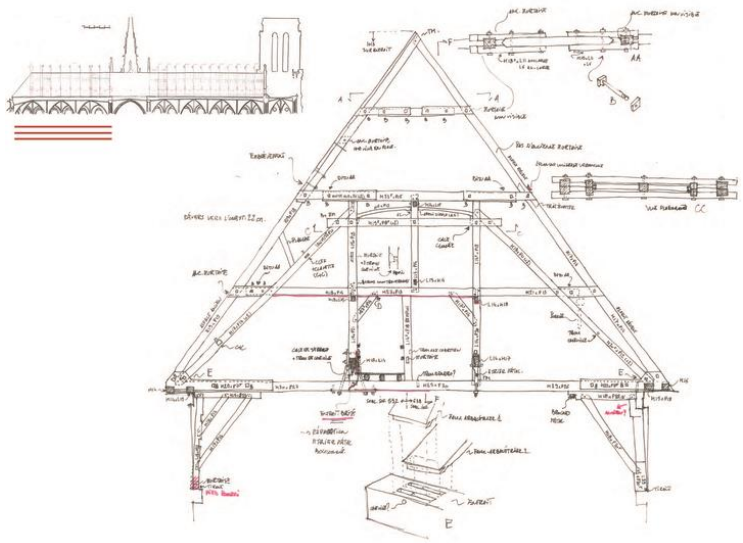


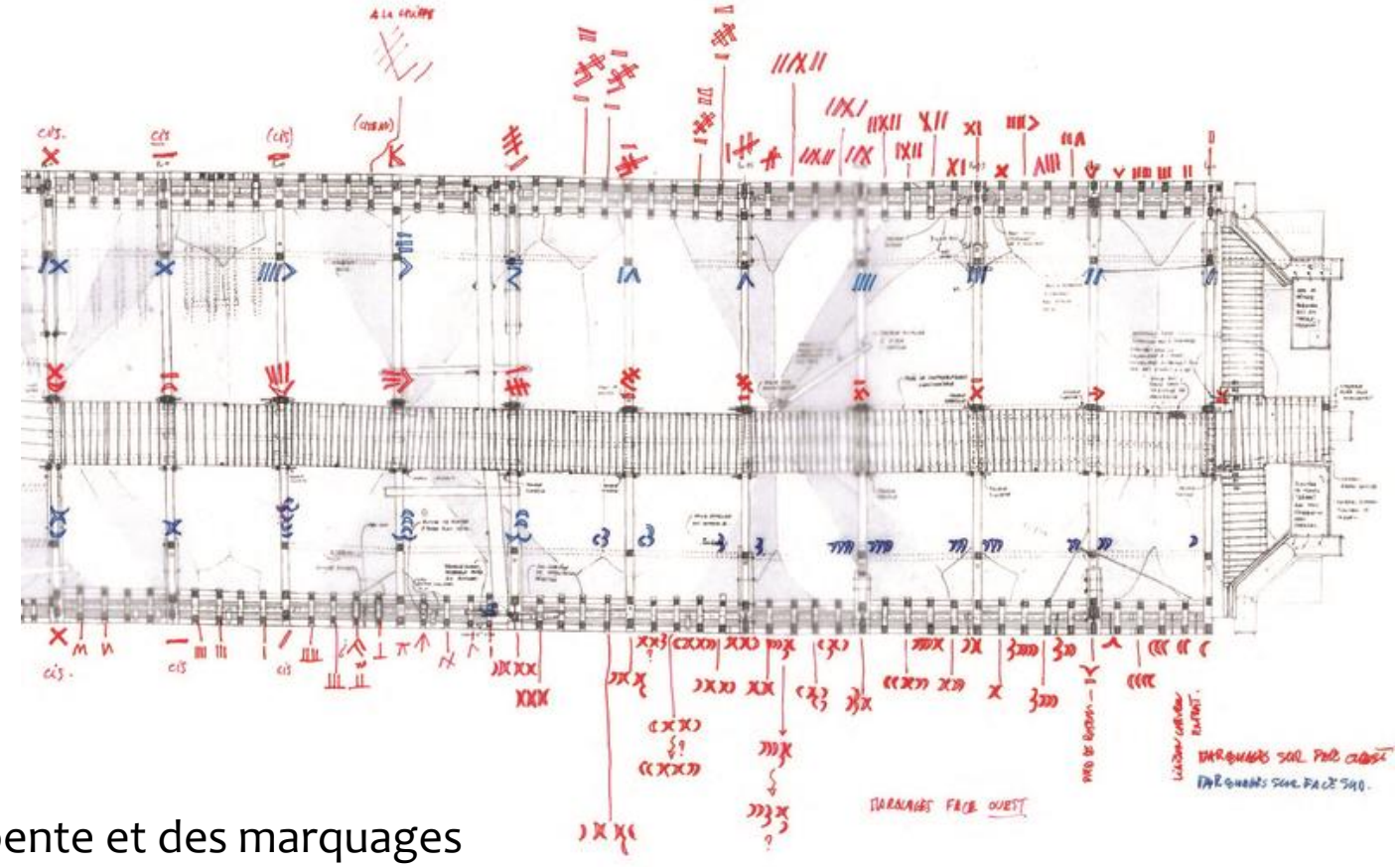
Chronologie

Source : groupe de travail « Bois » dirigé par Alexa Dufraisse

Des bois et des humains

« S’attacher à décrire ce qui n’avait encore jamais été regardé en détail : marquages, remplois, réparations, renforcements, levages. »





Relevé de la charpente et des marquages
© Rémi Fromont et Cédric Trentesaux / ministère de la Culture

https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/page/les-charpentes-medievales

Des bois et des humains

Des arbres jeunes (moins de 100 ans), fins et élancés
(25 cm de diamètre et 14 m de haut)

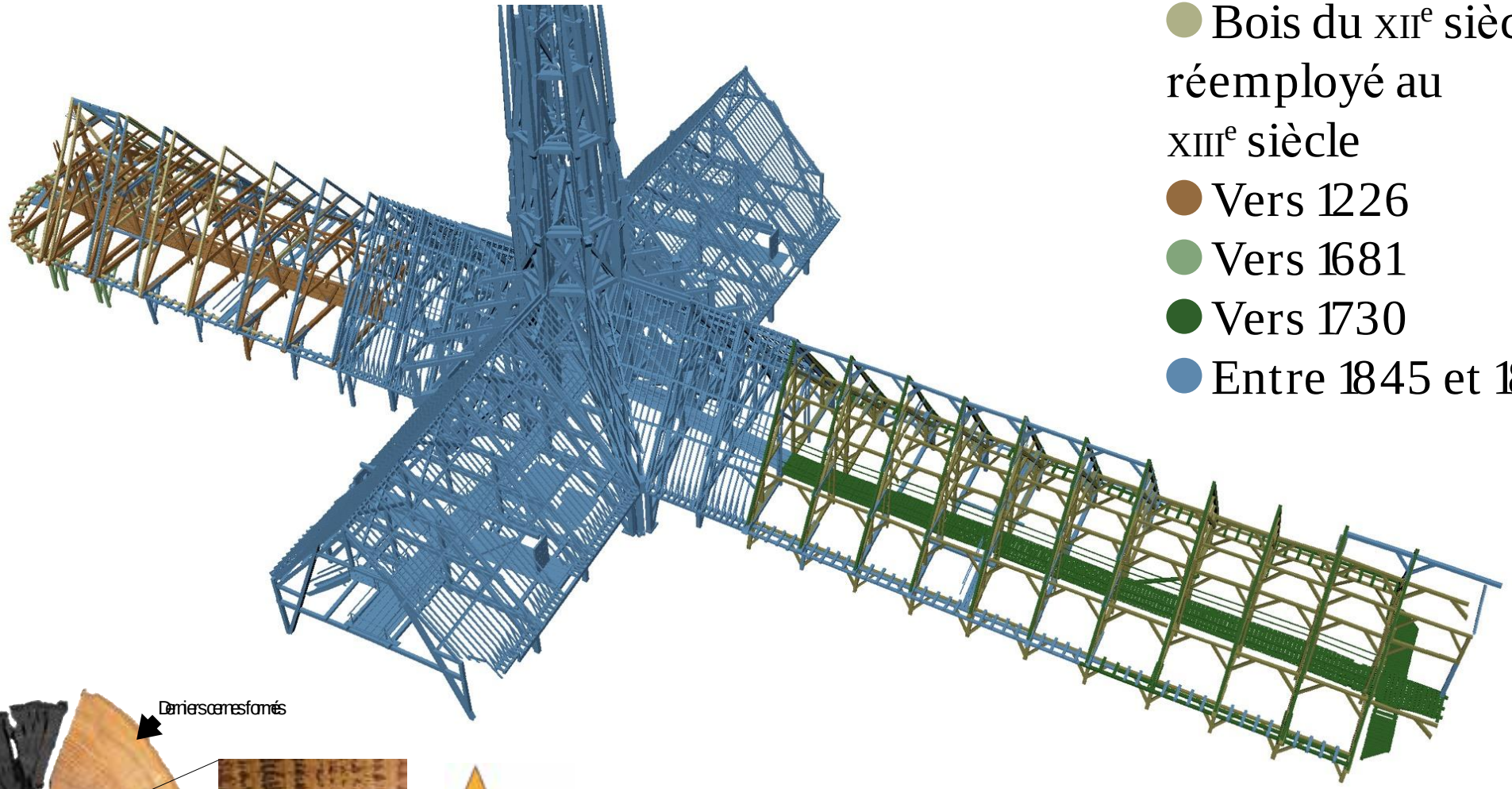
Typique des charpentes du 13e siècle.

Equarrissage de bois vert

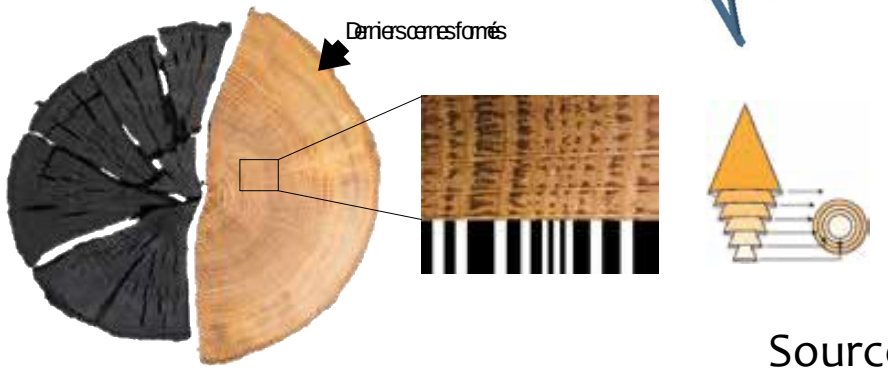
Des bois taillés verts

Source : groupe de travail « Bois » dirigé par Alexa Dufraisse

Le bois : une machine à remonter le temps

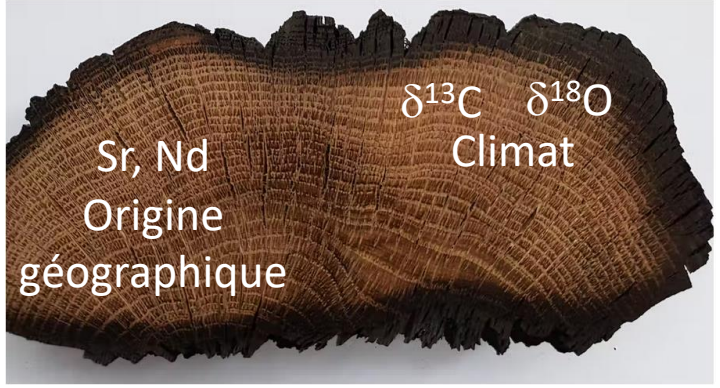


- Bois du XIIe siècle réemployé au XIIIe siècle
- Vers 1226
- Vers 1681
- Vers 1730
- Entre 1845 et 1864



Source : groupe de travail « Bois » dirigé par Alexa Dufraisse

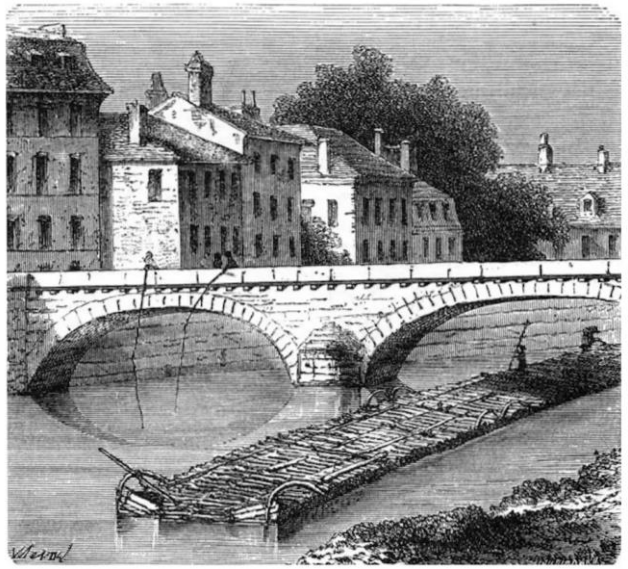
Bois des charpentes : climat, environnement, provenance



Coupe de bois de chêne archéologique, plus ou moins carbonisé en périphérie laissant apparaître les anneaux de croissance annuels. © A. Dufraisse

Dimensions et âges des arbres, densité des peuplements boisés, type de sylviculture, climat

Trous de flottage, entrait, 13e s.
O. Girardclos, J.-Y. Hunot



https://theconversation.com/dou-viennent-les-bois-de-notre-dame-les-scientifiques-menent-lenquete-185746

Les usages du monument : acoustique et ressenti

Objectif

Caractériser le **son** sous ses multiples dimensions, notamment **physique** et **ressenti**.

Comment ?

- à travers des interviews de personnes ciblées familières de l'acoustique de la cathédrale (musiciens, chanteurs, chef de cœur)

- par des mesures physiques dans la cathédrale

- Par la confrontation des perceptions humaines aux aux caractéristiques physiques de la cathédrale (importance de l'effet de réverbération du son).

=> Il ressort de ces recherches que si l'acoustique générale de la cathédrale est considérée comme de très bonne qualité, le travail est complexe pour les acteurs de la musique eux-mêmes.

Source des informations : groupes de travail « Acoustique » dirigé par Mylène Pardoen et « EMOBI » par Claudie Voisenat

Archéologie des paysages sonores

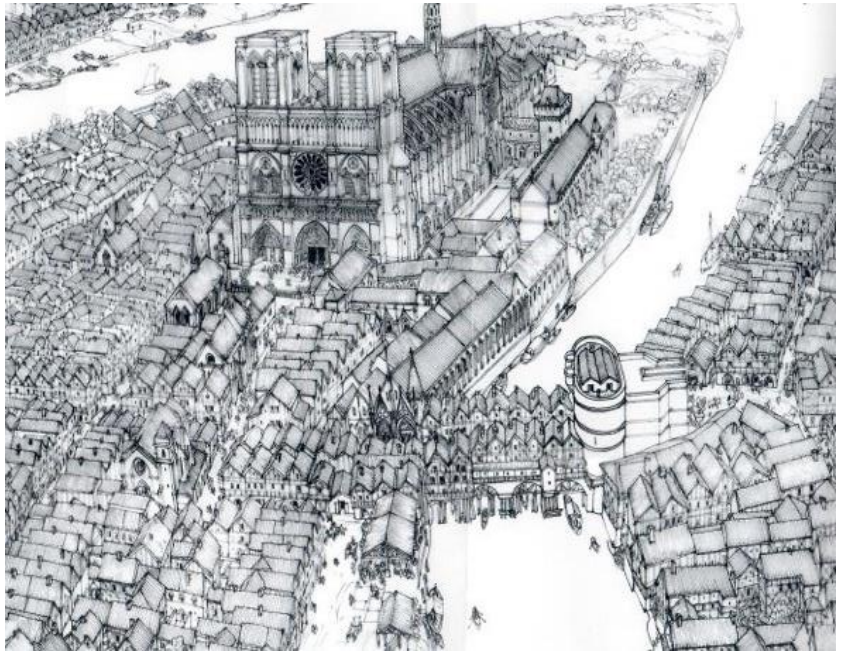
Objectif

Reconstituer les paysages sonores anciens à et autour de Notre-Dame (le son du chantier et de la ville)

Comment ?

- A partir d'enquêtes archivistiques et l'iconographie

- Grâce à l'enregistrement de sons actuels liés à des activités humaines mais aussi aux sons autour du monument (Seine par exemple)



Dessin J. C. Golvin dans Sandron (2021)

https://www.dailymotion.com/video/x7nrij3

Source des informations : groupe de travail « Acoustique » dirigé par Mylène Pardoen

Vers un double numérique augmenté de la cathédrale

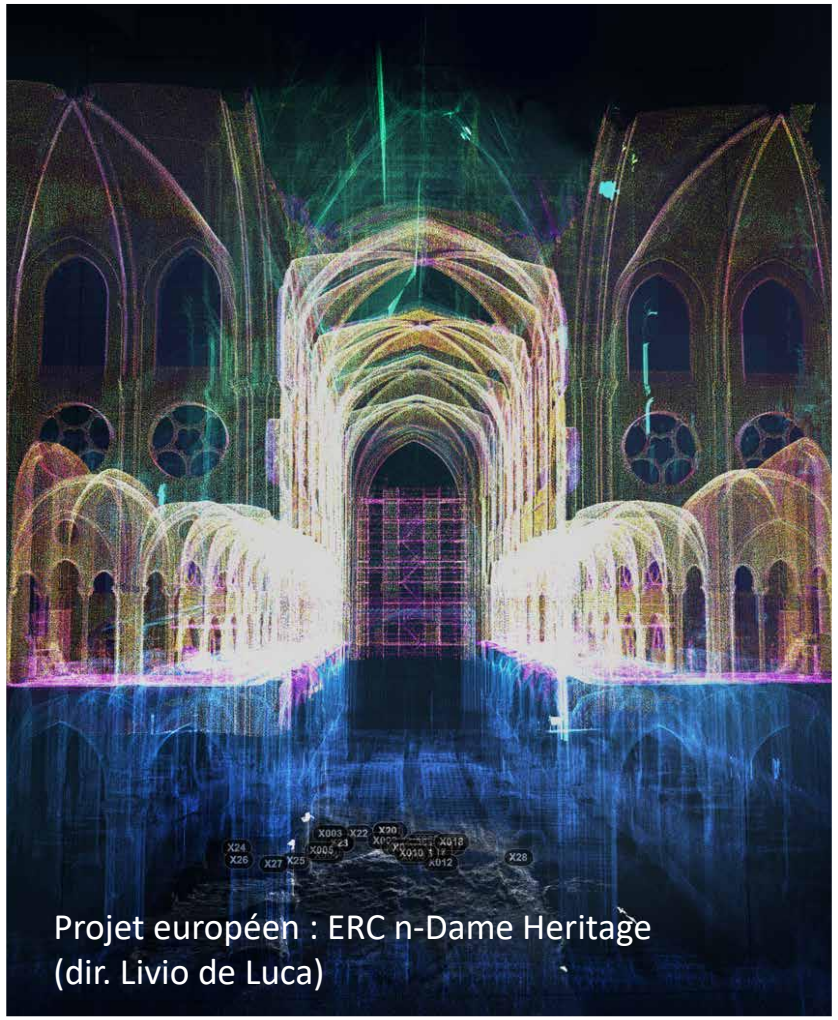
Construire une cathédrale de savoir

Produire un écosystème numérique
pour documenter le monument

Mettre en place une plateforme de données
diversifiées avec grande capacité de stockage

Mettre au point un outil permettant l'intégration
des données de tous les acteurs des recherches
et de la restauration et leur mise en lien

« pour la première fois à Notre-Dame de Paris, le virtuel devient une méthode d'investigation archéologique à part entière » Livio de Luca



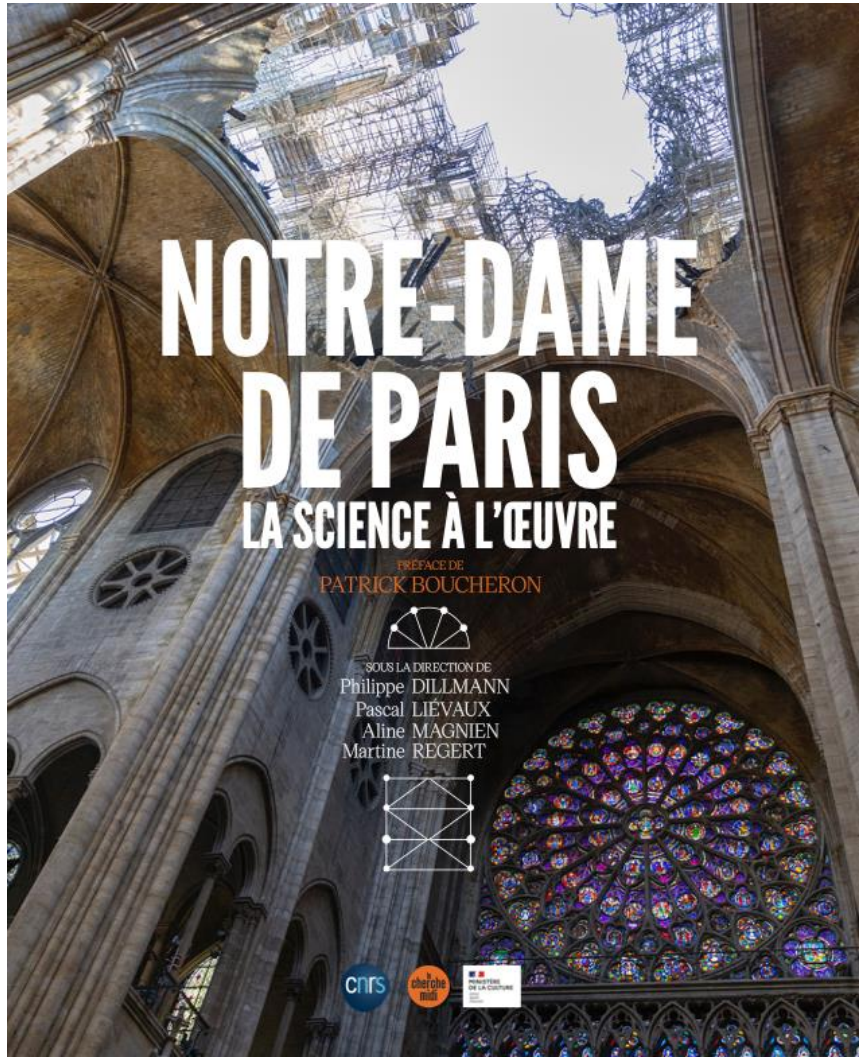
Projet européen : ERC n-Dame Heritage
(dir. Livio de Luca)

Source des informations : GT « Numérique

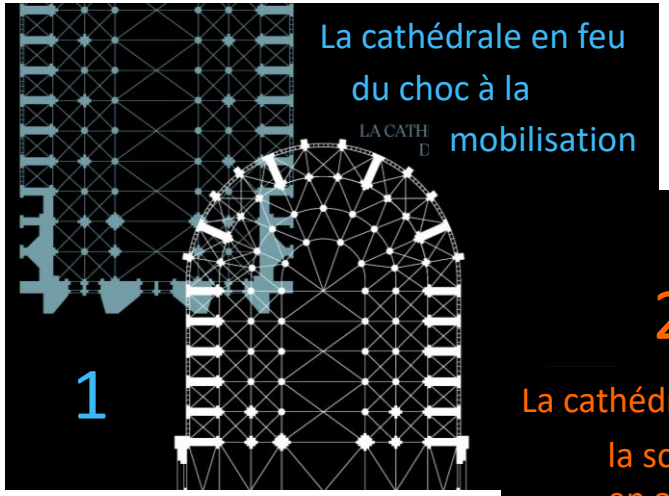
Gros *et al.*, Faceting the post-disaster built heritage reconstruction process within the digital twin framework for Notre-Dame de Paris. *Scientific reports* (2023) 13:5981

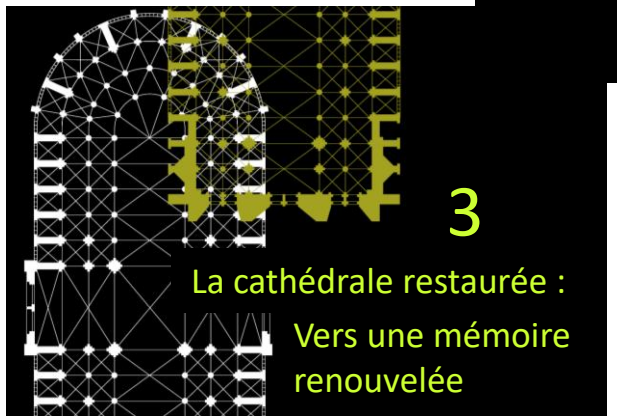
Une fabuleuse aventure scientifique et humaine

« Nous voici donc face au paradoxe ordinaire de la connaissance archéologique : il ne peut y avoir de savoir sans destruction. »



Patrick Boucheron - Professeur au Collège de France





Pour aller plus loin - 3 docus sur ARTE

https://www.arte.tv/fr/videos/103501-001-A/notre-dame-de-paris-le-chantier-du-siecle-1-3/

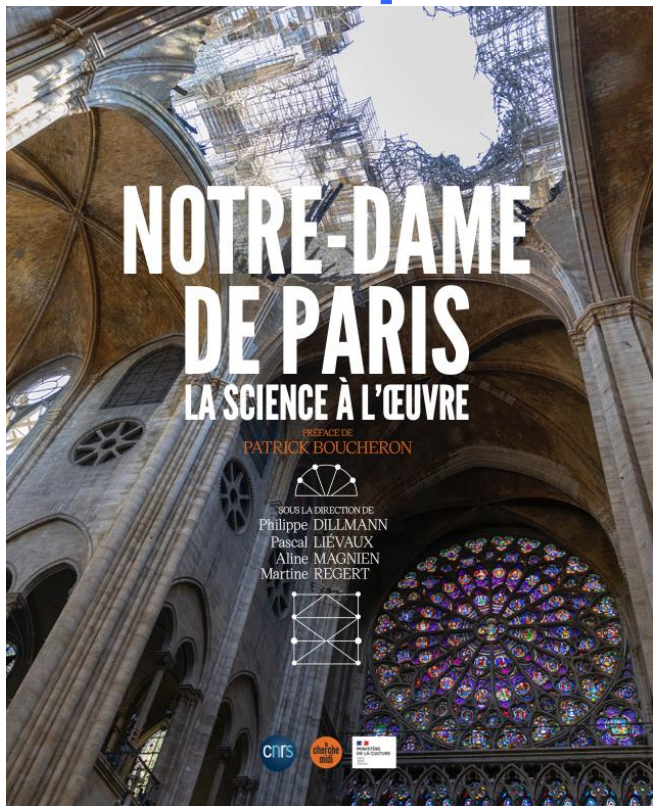
Notre-Dame de Paris, le chantier du siècle

Notre-Dame de Paris, le chantier du siècle (1/3)
La quête de la hauteur

Notre-Dame de Paris, le chantier du siècle (2/3)
L'harmonie des forces

Notre-Dame de Paris, le chantier du siècle (3/3)
La fabrique du sacré

Pour aller plus loin



Journal of Cultural Heritage – n° spécial en cours de réalisation (plusieurs articles sont déjà en ligne)

Le chantier du siècle (**ministère de la Culture**)

https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr

Articles dans le **Journal du CNRS**

https://lejournal.cnrs.fr/dossiers/notre-dame-de-la-recherche

Articles dans **The Conversation**

https://theconversation.com/dossier-les-sciences-au-service-de-notre-dame-de-paris-188755

Reportage « **Les secrets des matériaux** »

https://www.youtube.com/watch?v=YTIgxVTP6uk

Reportage « **Le chantier numérique** »

https://lejournal.cnrs.fr/videos/notre-dame-du-numerique

Reportage « **Emotions patrimoniales** »

Comment restaurer Notre-Dame-de-Paris ? De l'émotion aux sciences

https://www.youtube.com/watch?v=LHInruack9k&list=RDCMUC3E2DhYIqnoc6H3WXwTVnlA

La fabrique de Notre-Dame https://www.rebatirnotredamedeparis.fr/lafabriquedenotredame

Merci aux responsables de Groupe de Travail

Alexa Dufraisse
GT Bois

Dany Sandron
GT Décor monumental

Maxime L'Héritier
GT Métal

Yves Gallet
GT Pierre

Claudine Loisel
GT Verre

Stéphane Morel
GT Structure

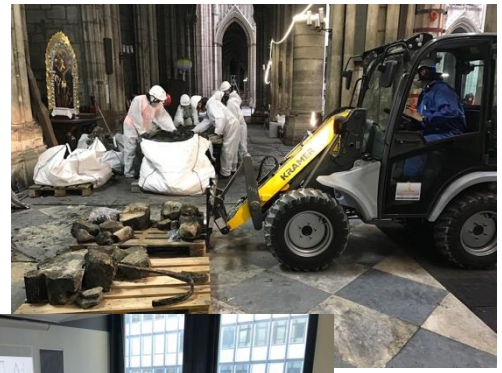
Livio De Luca
GT Numérique

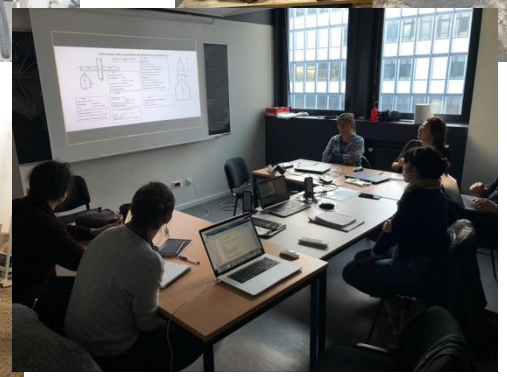
Mylène Pardoen
GT Acoustique

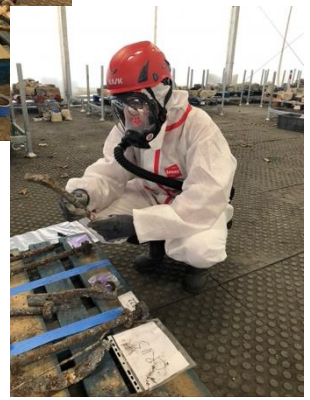
Claudie Voisenat
GT EMOBI

Merci également à Alexis Komenda (C2RMF)

Merci à tous les membres du chantier scientifique







SOPHIE AYRAULT
CEA, GT Métal

AURÉLIA AZÉMA
Ministère de la Culture,
GT Métal

KÉVIN BECK
Université d'Orléans,
GT Pierre

CHRISTOPHE BESNIER
Inrap

BÉATRICE
BOUET-LANGLOIS
Ministère de la Culture

MARC BOUIRON
Inrap

XAVIER BRUNETAUD
Université d'Orléans,
GT Pierre

DOROTHÉE
CHAOUI-DERIEUX
Ministère de la Culture,
GT EMOBI

STÉPHANIE DIANE
DAUSSY
GT Métal

LIVIO DE LUCA
Coordinateur
du GT Numérique

MARIE-HÉLÈNE DIDIER
Ministère de la Culture,
GT Décor monumental

PHILIPPE DILLMANN
CNRS, coordinateur,
GT Métal

STÉPHANIE DUCHÊNE
Ministère de la Culture,
GT Décor monumental

ALEXA DUFRAISSE
CNRS, coordinatrice
du GT Bois et Charpente

JEAN-LUC DUPOUEY
INRAE, GT Bois
et Charpente

ALINE DURAND
Le Mans Université,
GT Bois et Charpente

RÉMI FROMONT
Architecte en chef des
monuments historiques

YVES GALLET
Université Bordeaux-
Montaigne, coordinateur
du GT Pierre

OLIVIER GIRARDCLOS
CNRS, GT Bois et Charpente

JEAN-YVES HUNOT
Ministère de la Culture,
GT Bois et Charpente

CYRIL ISNART
CNRS, GT EMOBI

PHILIPPE JOST
EPND

JUDITH KAGAN
Ministère de la Culture

BRIAN FG KATZ
CNRS, GT Acoustique

ALEXIS KOMENDA
Ministère de la Culture

CATHERINE LAVIER
Ministère de la Culture,
GT Bois et Charpente

LISE LEROUX
Ministère de la Culture,
GT Pierre

MAXIME L'HÉRITIER
Université Paris-8,
coordinateur du GT Métal

PASCAL LIÉVAUX
Ministère de la Culture,
coordinateur

CLAUDINE LOISEL
Ministère de la Culture,
coordinatrice du GT Verre

ALINE MAGNIEN
Ministère de la Culture,
coordinatrice

JEAN-CHRISTOPHE
MONFERRAN
CNRS, GT EMOBI

STÉPHANE MOREL
Université de Bordeaux,
coordinateur
du GT Structures

FLORENCE MOUSSET
Ministère de la Culture

MYLÈNE PARDOEN
CNRS, coordinatrice
du GT Acoustique

SIMON PELLEQUER
Forgeron

ÉLISABETH PILLET
Ministère de la Culture,
GT Verre

PASCAL PRUNET
Architecte en chef des
monuments historiques

OLIVIER PUAUX
Ministère de la Culture

MARTINE REGERT
CNRS, coordinatrice

SYLVIE SAGNES
CNRS, GT EMOBI

GASPARD SALATKO
Fondation des sciences du
patrimoine, GT EMOBI

DANY SANDRON
Sorbonne Université,
coordinateur
du GT Décor monumental

DELPHINE SYVILAY
GT Métal

BERNARD THIBAUT
CNRS, GT Bois et
Charpente

JONATHAN TRUILLET
EPND

PHILIPPE VILLENEUVE
Architecte en chef des
monuments historiques

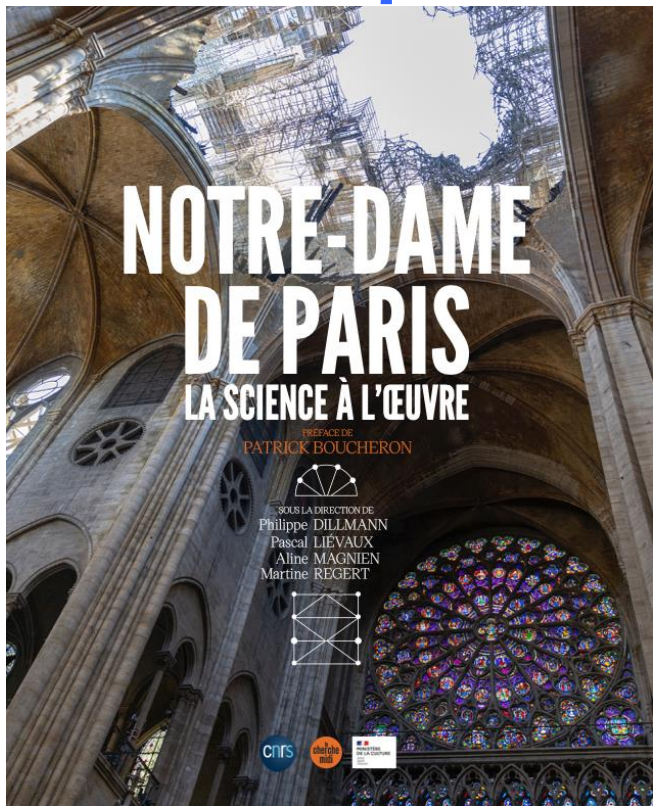
CLAUDIE VOISENAT
Ministère de la Culture,
coordinatrice
du GT EMOBI

ARNAUD YBERT
Université de Bretagne
Occidentale, GT Pierre

THIERRY ZIMMER
Ministère de la Culture

Merci de votre attention. Des questions ?

Pour aller plus loin



Journal of Cultural Heritage – n° spécial en cours de réalisation (plusieurs articles sont déjà en ligne)

Le chantier du siècle (**ministère de la Culture**)

https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr

Articles dans le **Journal du CNRS**

https://lejournal.cnrs.fr/dossiers/notre-dame-de-la-recherche

Dossier dans **The Conversation**

https://theconversation.com/dossier-les-sciences-au-service-de-notre-dame-de-paris-188755

Reportage « **Les secrets des matériaux** »

https://www.youtube.com/watch?v=YTIgxVTP6uk

Reportage « **Le chantier numérique** »

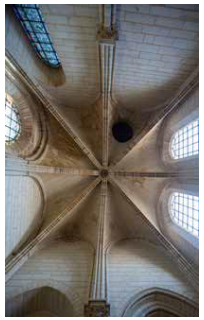
https://lejournal.cnrs.fr/videos/notre-dame-du-numerique

Reportage « **Emotions patrimoniales** »

Comment restaurer Notre-Dame-de-Paris ? De l'émotion aux sciences

https://www.youtube.com/watch?v=LHInruack9k&list=RDCMUC3E2DhYIqnoc6H3WXwTVnlA

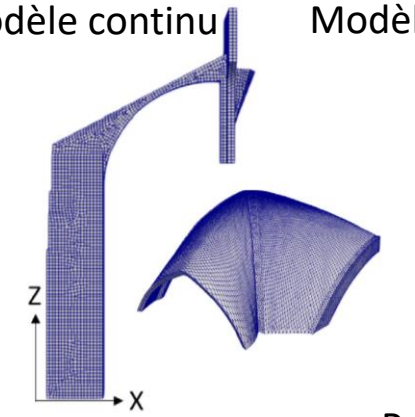
La fabrique de Notre-Dame https://www.rebatirnotredamedeparis.fr/lafabriquedenotredame



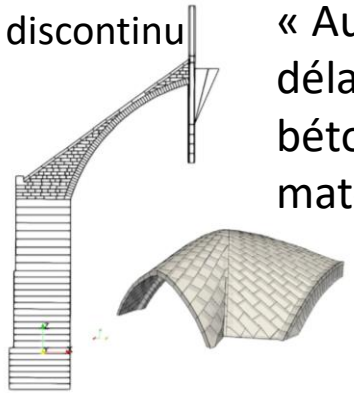
Les défis de la modélisation

« Le comportement mécanique d'une structure maçonnée s'avère extrêmement complexe à appréhender : une maçonnerie en pierres de taille appareillées comme celle de la cathédrale Notre-Dame se rapproche d'un matériau composite, anisotrope (matériau dont les propriétés mécaniques varient en fonction de la direction considérée dans le matériau) et hétérogène, constitué de blocs de pierres de taille assemblés par des joints minces de mortier de chaux, dont l'interface pierre-mortier constitue une zone de faiblesse mécanique. »

Modèle continu



Modèle discontinu



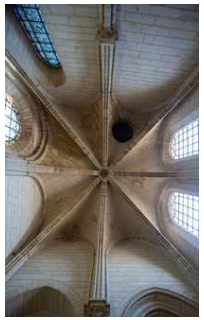
Parent *et al.*, 2023, JCH

« Au XXe siècle, la construction de grands édifices a progressivement délaissé la maçonnerie au profit de la construction métallique et du béton armé ; l'effort de calcul/modélisation s'est alors porté sur ces matériaux modernes. »

=> Il n'existe à l'heure actuelle pas de méthode de calcul pour modéliser fidèlement le comportement mécanique de structures architecturales gothiques

=> Développement d'un **modèle hybride** combinant approches **continues** et **discontinues** (ANR DEMMEFI – dir. T. Parent)

https://theconversation.com/estimer-la-solidite-des-vou-tes-de-notre-dame-apres-lincendie-186333



L’art des voûtes : recherche en génie mécanique

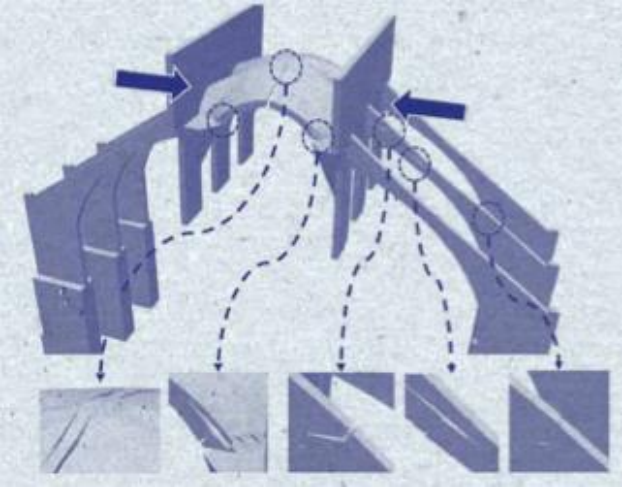
Objectifs des recherches

Etudier l’effet de la disparition de la charpente sur la statique de l'édifice.

Appréhender l'ordre de construction des différents éléments (voûtes et arcs-boutants).

Méthodologie

Approches modélisatrices avec deux modèles (discret et continu)



Source des informations : groupe de travail « Structures » dirigé par Stéphane Morel

Les pierres de Notre-Dame

Collecte des vestiges au sol, enlèvement des blocs des voûtes et tri des éléments : moments clés pour les observations et les prélèvements.

Objectifs :

- Identification des matériaux

- Diagnostic et étude des dommages causés par le feu

- La pierre dans la structure de l'édifice (mortiers, voûtes)

Avril 2019 - février 2020 (SRA/LRMH/Police scientifique/Inrap)

Les pierres de Notre-Dame

Complémentarité de la documentation du 19e siècle, des études scientifiques réalisées lors des travaux de restauration ces 50 dernières années et des recherches actuelles en pétrographie.

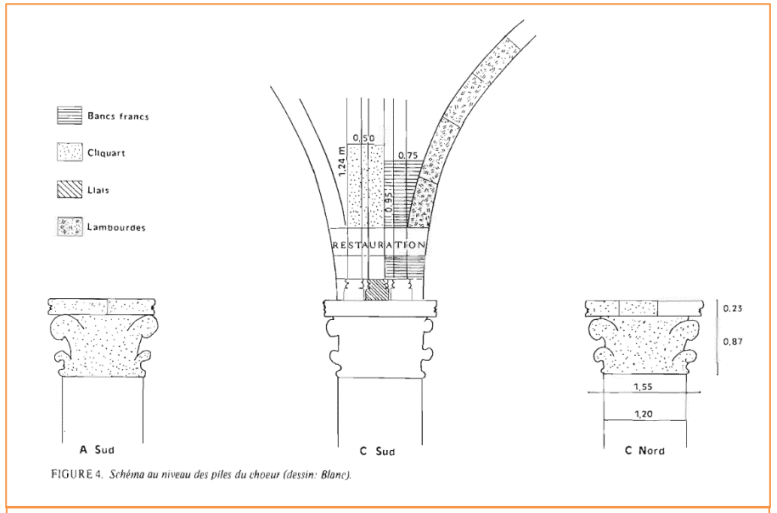
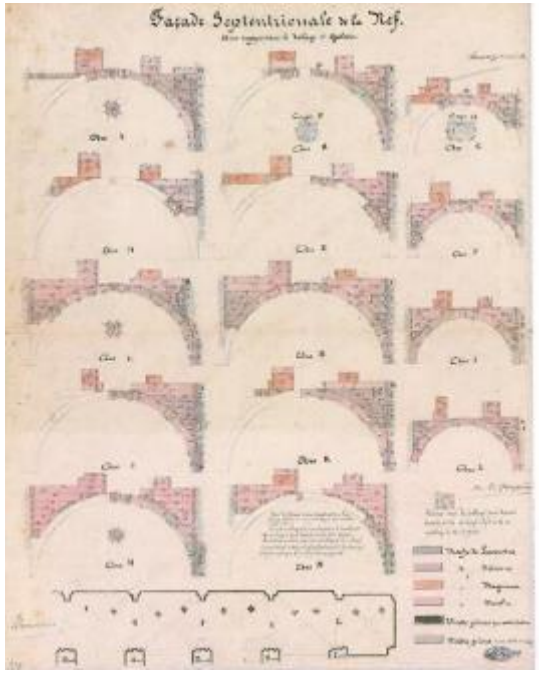


FIGURE 4. *Schéma au niveau des piles du choeur (dessin: Blanc).*

BLANC, (A.) , LORENZ (C.), Observations sur la nature des matériaux de la cathédrale Notre- Dame de Paris, (S.l.) : The International center of medieval art, 1990,



19e siècle : Travaux de Viollet-le-Duc

Années 1960 – 1990 : nettoyage portail central façade occidentale, nettoyage des voûtes de la nef, suivi de la restauration de la tour sud

Depuis 2000 : étude de Lise Leroux et collaborateurs préalablement à des étapes de restauration (de la Porte Rouge et du chevet-contrefort)

Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Travaux de Lise Leroux et collaborateurs

Les pierres de Notre-Dame

- Contrôles visuels *in situ*

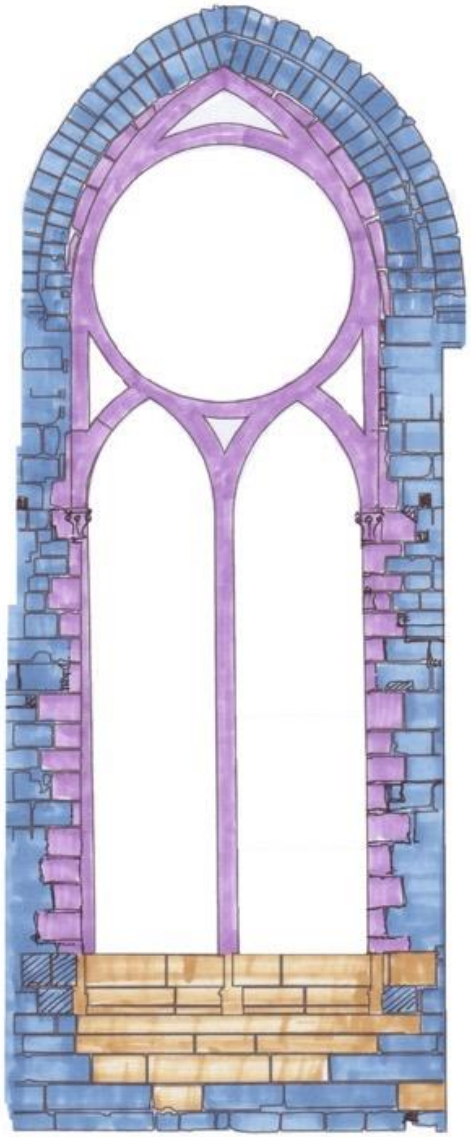
- Choix et prélèvement des échantillons pour caractérisation **pétrographique**

=> Origine géologique / géographique

1970–2020
LRMH
Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Les pierres de Notre-Dame

Observations sur site, relevés, cartographie et mise en lien des fragments issus de l'effondrement des voûtes



Traces de taille de pierre

Paris, Notre-Dame,
cartographie des traces de taille sur une fenêtre de la nef
(B. Phalip, D. Nouzeran,GT Pierre, 2022)

Notre-Dame de Paris,. Cl. Y. Gallet, GT Pierre, 2021

Relevé de signe lapidaire

© Alexis Komenda

Assemblage des pierres tombées de la voûte

Les pierres de construction de la cathédrale

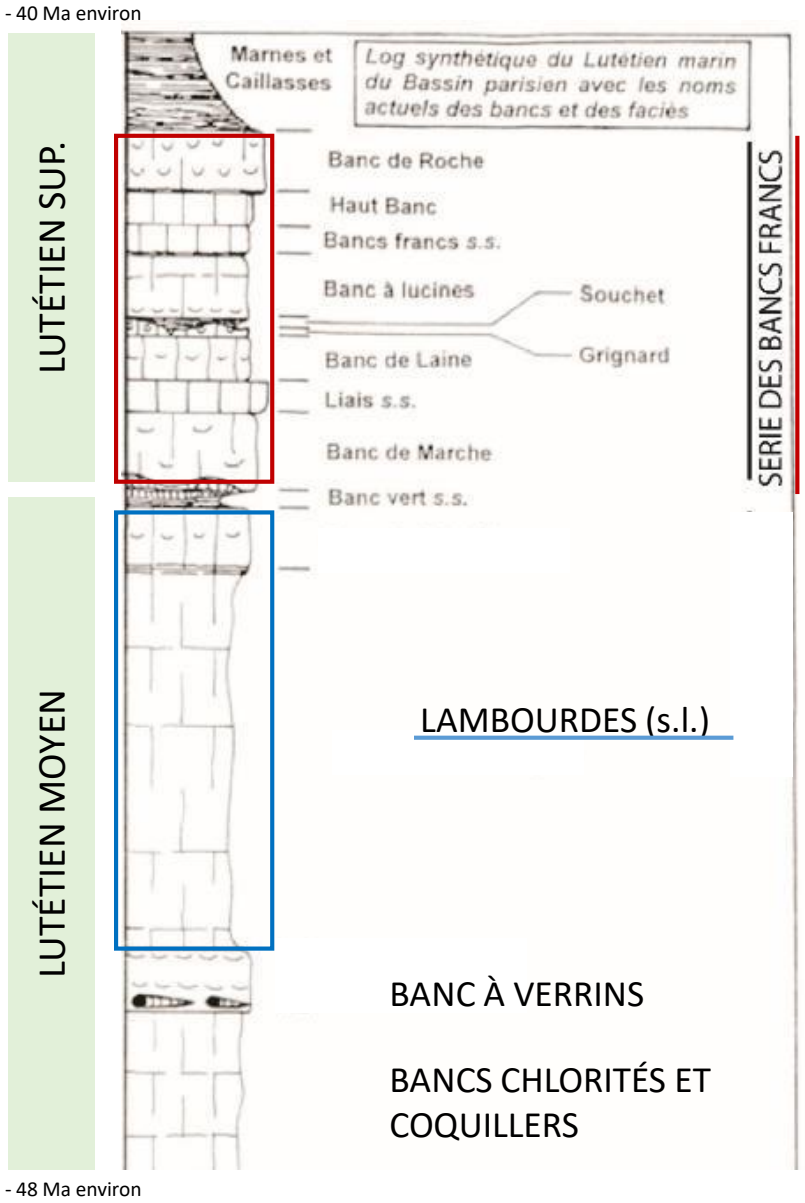
Les roches de Notre-Dame de Paris sont en calcaire.

Ce calcaire provient essentiellement du bassin parisien (calcaire lutétien) pour le Moyen Âge.

Au cours des siècles suivants, les pierres utilisées proviennent de carrières de plus en plus éloignées de Paris, du fait de l'épuisement des gisements d'origine ou de leur inaccessibilité (urbanisation, etc.).

Sont alors utilisées de pierres de substitution, en provenance de la Petite et Grande Couronne, puis de Picardie (Oise, Aisne).

A partir du 19e siècle, on procède à une utilisation ciblée et limitée de pierres de substitution provenant d'autres bassins calcaires français.

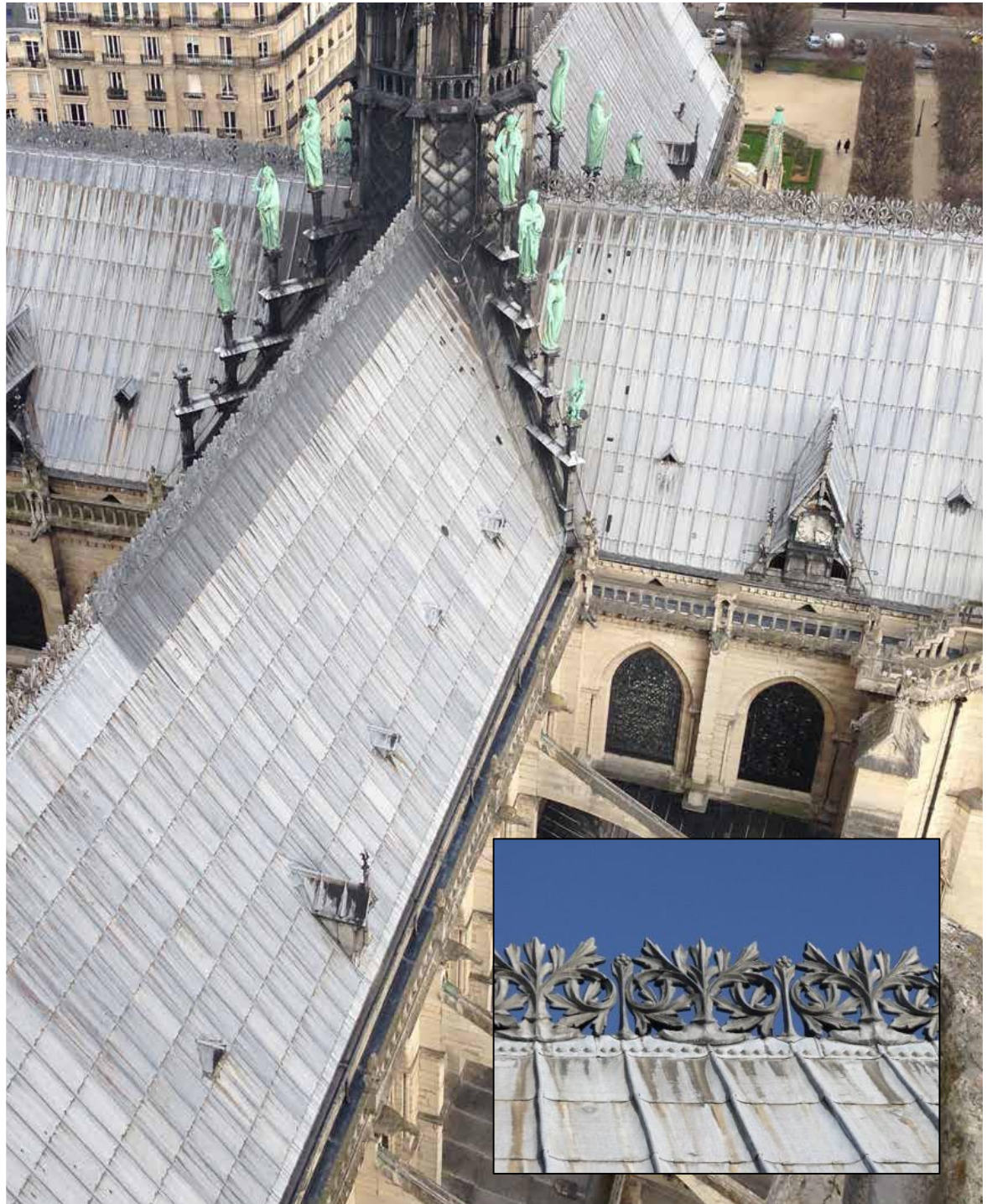


Le Plomb à Notre-Dame

Au moins 3 couvertures successives en plomb (12e s. ? 13e s. 18e s. et 19e s.)

Plaques de plomb du transept

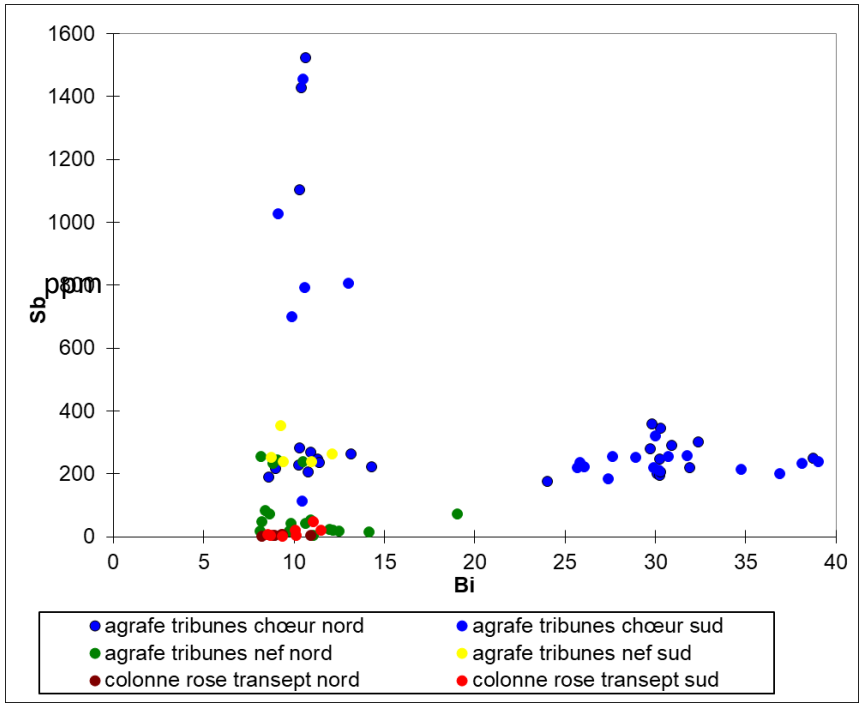
Scellements au plomb (baies supérieures du 13e s.)



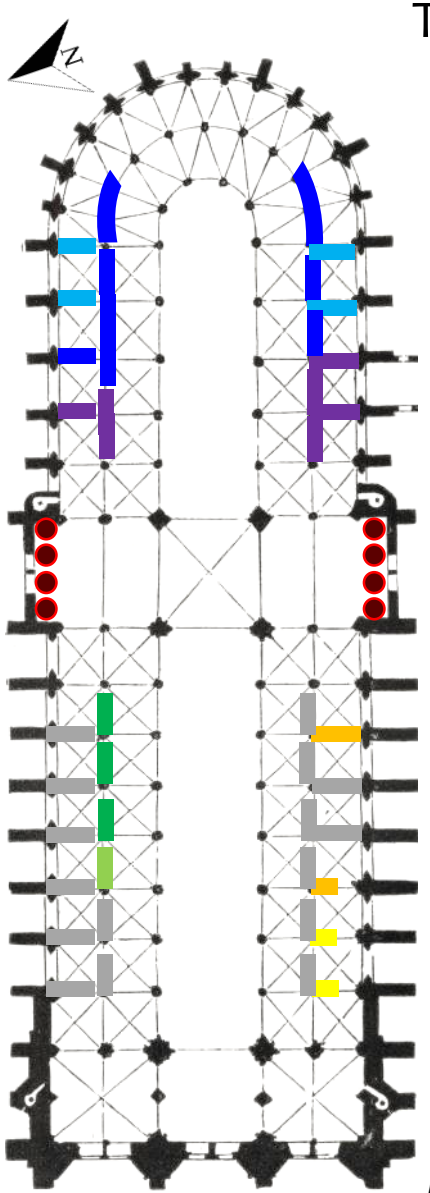
Groupe de travail Métal : M. L'Héritier, A. Azema, D. Syviley, S. Ayrault, *et al.*

Signature
d'un artisan
1862

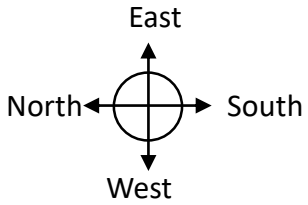
Scellements au plomb - Analyses chimiques (phasage du chantier)



Tribunes of Notre-Dame de Paris



- Sn > 5%, Bi 30-40 ppm
- BI 9-12, Sn 0-500, Cu > 300 ppm
- BI 9-12, Sn 0-500, Cu < 300 ppm
- Cu 500-600, Bi 9-12, Sn < 200 ppm
- Cu 200-300, Bi 9-12, Sn < 200 ppm
- Cu < 100, Bi 9-12, Sn < 200 ppm
- Cramp and sealing not visible

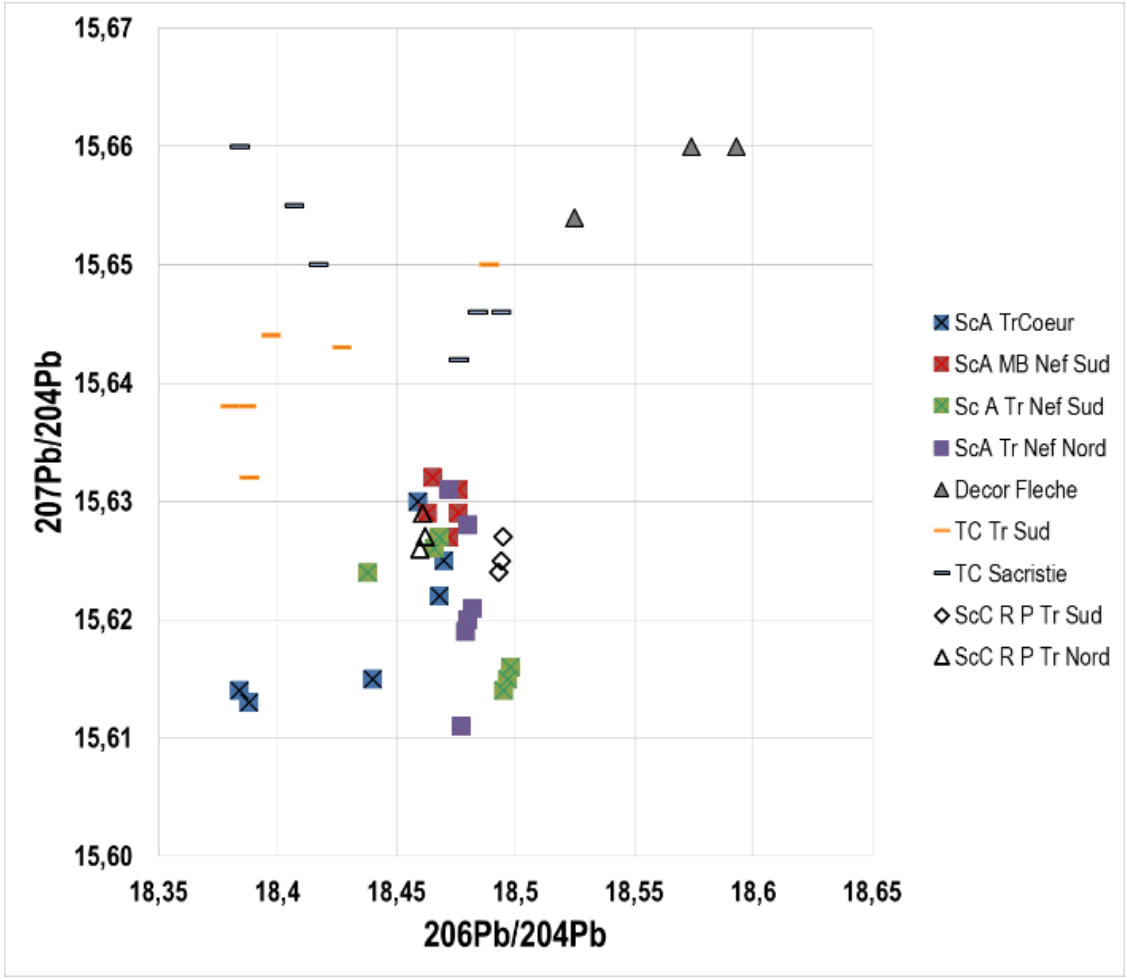


ppm

Map Notre-Dame de Paris cathedral

Provenance du plomb ? Analyses isotopiques

^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb (en cours)



Différentes sources de plomb (même pour les plus anciennes phases de construction du 12e s.).

Mise en évidence de mélanges. En particulier pour les plombs du 19e s. (quelles sources ?)
Mais aussi cas des plombs médiévaux.

Un référentiel à construire.

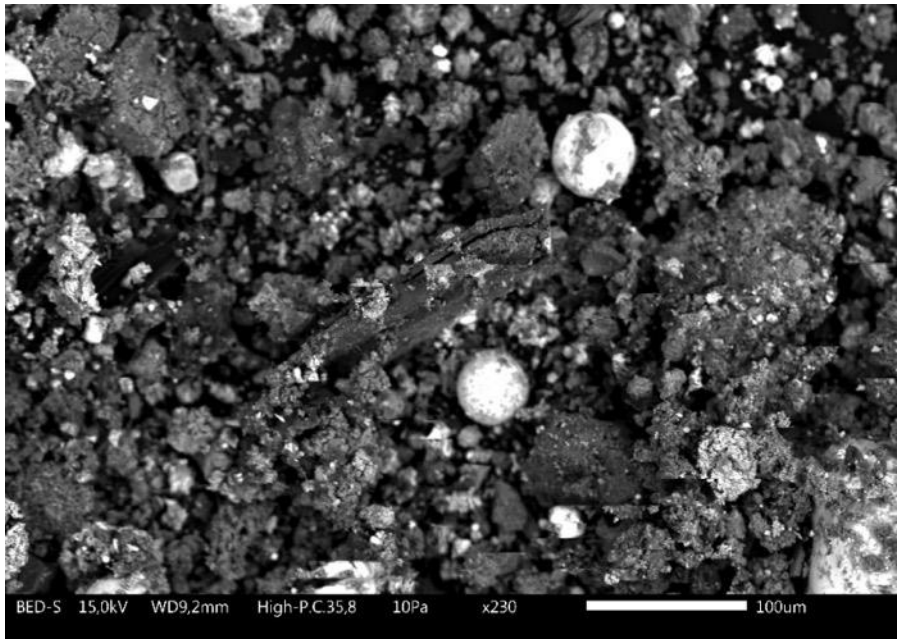
Comparaisons avec d'autres monuments contemporains (Chartres, Laon, Sainte-Chapelle, ...)

Plomb et environnement

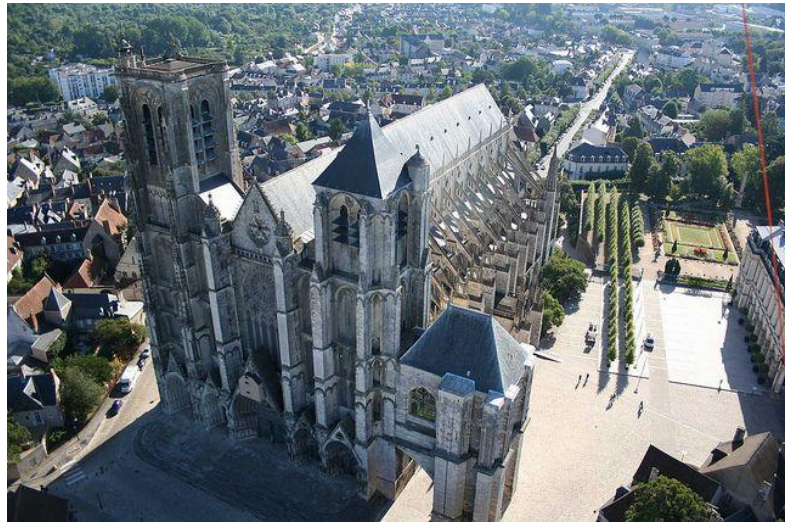
Analyse des poussières de l'incendie
=> Discrimination de la signature chimique de l'incendie par rapport aux autres sources de plomb urbain
=> Mise en place d'un protocole d'étude des poussières

Comparaisons avec des sites contemporains et géographiquement proches (Sainte-Chapelle de Paris...)
=> Étude de l'impact du plomb sur les Monuments Historiques dans différents contextes (fonctionnement normal, travaux, incendie...)

Étude de la transformation du plomb et de son interaction avec d'autres matériaux pendant l'incendie.
=> dépollution, compréhension des altérations causées par le feu



Le fer – un matériau peu visible mais essentiel



Bourges

Chartres

Source des informations : groupe de travail « Métal » dirigé par Maxime L'Héritier

Premiers résultats publiés dans Plos ONE

PLOS ONE https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0280945

RESEARCH ARTICLE

Notre-Dame de Paris: The first iron lady? Archaeometallurgical study and dating of the Parisian cathedral iron reinforcements

Maxime L'Héritier[1]*, Aurélia Azéma[2], Delphine Syvilay[3], Emmanuelle Delqué-Kolic[4], Lucile Beck[4], Ivan Guillot[5], Mathilde Bernard[6], Philippe Dillmann[6]

FRANÇAIS ENGLISH

Le Monde

Notre-Dame de Paris, la pionnière des « dames de fer »

Les agrafes métalliques utilisées pour fixer les pierres de la cathédrale, et dévoilées par l'incendie de 2019, ne sont pas le fait d'une rénovation. Ces pièces d'origine constituent même le plus ancien usage massif de fer dans un monument gothique.

Par Nathaniel Herzberg

Publié le 15 mars 2023, modifié le 16 mars 2023 à 12h00 · Lecture 3 min. · Read in English

Offrir l'article

Article réservé aux abonnés

Sur le chantier de la cathédrale, le 8 décembre 2020. A gauche, des agrafes de fer attachent les pierres d'un mur supérieur de Notre-Dame de Paris. MAXIME L'HÉRITIER

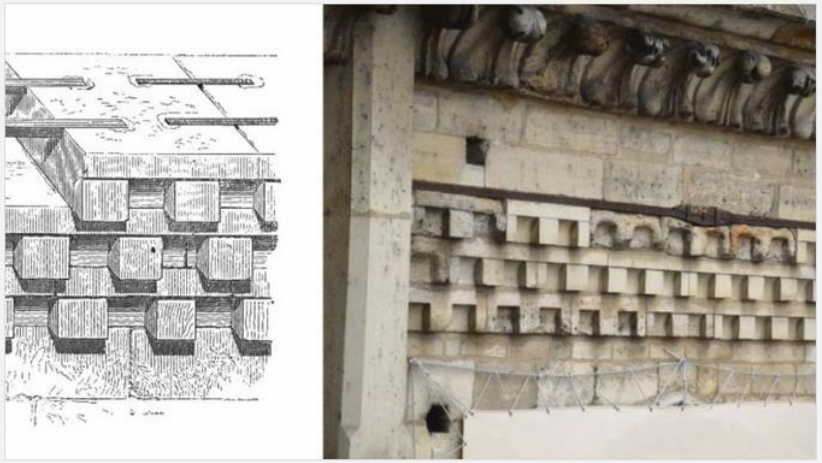
l'Humanité

ACTU

Notre-Dame, la première Dame de fer à Paris

Quatre ans après l'incendie de Notre-Dame, les travaux scientifiques menés sur la cathédrale gothique livrent de nombreuses surprises. Une étude récente montre l'usage massif et innovant d'agrafes de fer dans l'architecture.

Publié le Mardi 28 mars 2023 - Anna Musso



Vue de la corniche à carreaux du chœur avec sa série d'agrafes dessinées par Viollet-le-Duc (à gauche) et aujourd'hui, avec les chaînes mises en œuvre par Lassus (à droite). © Maxime L'Héritier

Libération

Trésor caché

Notre-Dame de Paris première dame «de fer»

L'incendie de Notre-Dame

Notre-Dame de Paris est aussi «de fer», dévoile ce mercredi une étude archéologique sur le bâtiment, dont l'incendie en 2019 a révélé le premier usage massif d'agrafes de fer pour la construction d'une cathédrale gothique.

Notre-Dame, le 24 novembre 2020, à Paris. (Martin Bureau/AFP)

par LIBERATION et AFP
publié le 15 mars 2023 à 22h02

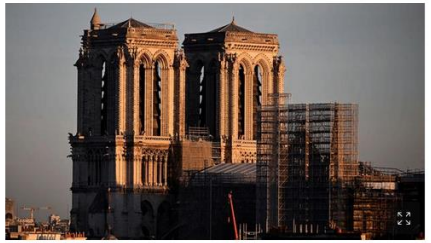
Il aura fallu la quasi-destruction de Notre-Dame de Paris et un chantier de restauration colossal, toujours en cours, pour que la cathédrale la plus célèbre du monde commence à livrer les secrets de sa construction, entamée en 1160 et terminée près d'un siècle plus tard. Notre-Dame de Paris est aussi «de fer». L'incendie du 15 avril 2019 a ainsi dévoilé, par la destruction, la contribution des agrafes de fer à l'édification du monument, pointe une étude archéologique publiée ce mercredi.

LE FIGARO

La restauration de Notre-Dame révèle les secrets de ses agrafes de métal

Par Le Figaro avec AFP
Publié le 16/03/2023 à 11:13 , mis à jour le 18/03/2023 à 01:59

Écouter cet article 00:00/04:32



La cathédrale pourrait compter plus d'un millier d'agrafes de fer de tailles variables, estiment les chercheurs chargés de l'examen des parties métalliques de Notre-Dame de Paris. *Emmanuel DUNAND, AFP*

L'édifice aurait été la première cathédrale gothique à faire un usage massif et innovant de ces pièces de fer qui servaient à renforcer le lien entre deux blocs.

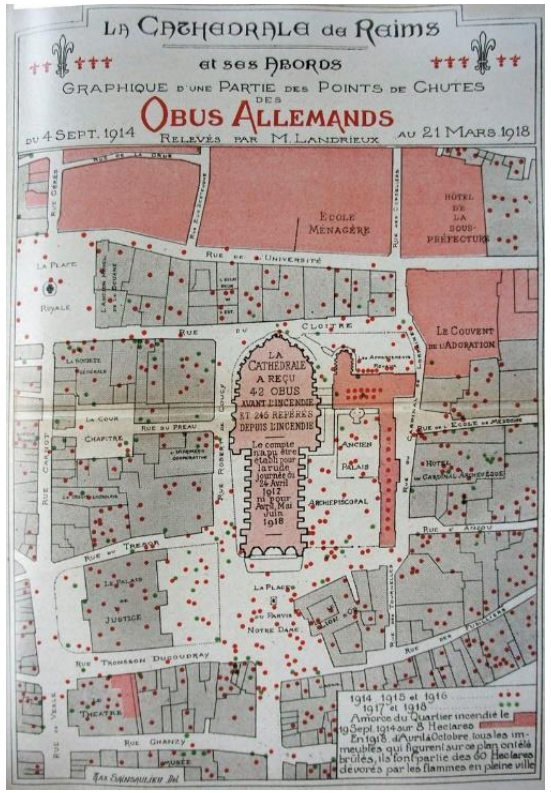
La Dame de Fer se découvre une rivale inattendue. Quelques siècles avant l'érection, rive gauche, de la tour Eiffel, spectaculaire vedette de l'exposition universelle de 1889, la cathédrale Notre-Dame de Paris peut également prétendre être un des premiers monuments en fer de la capitale. L'édifice gothique serait la première église au monde à avoir employé massivement des agrafes métalliques lors de sa construction.

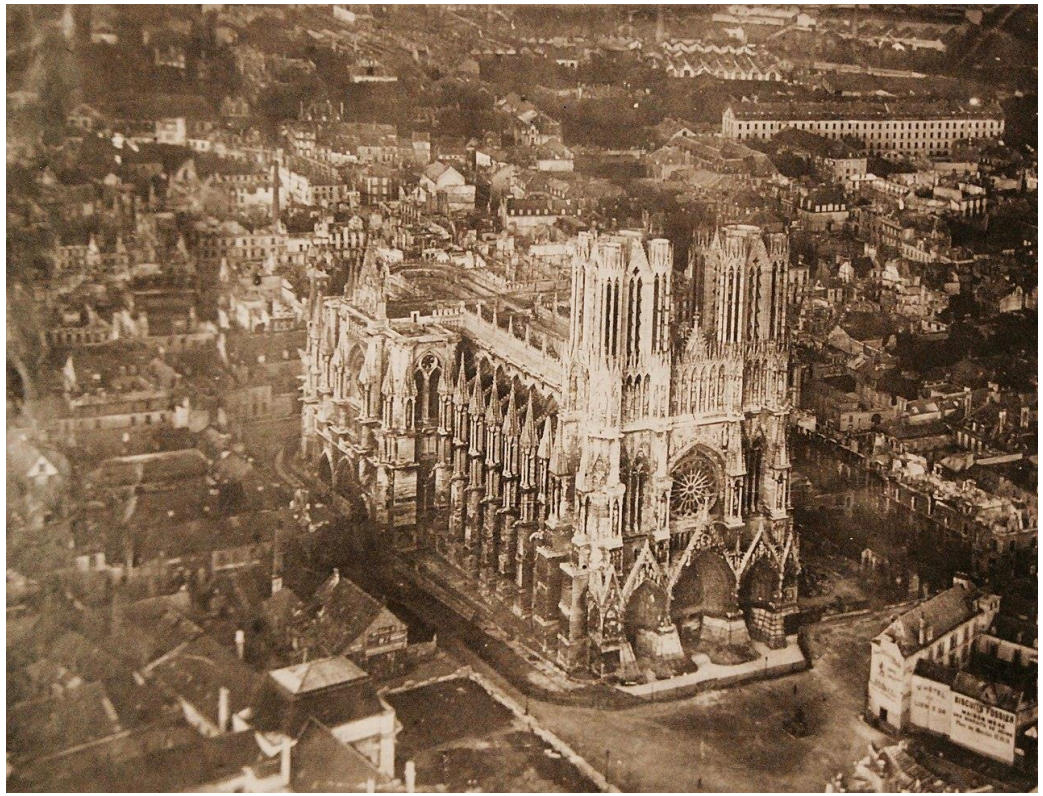
Cathédrale de Reims pendant la guerre de 14-18

Gargouille crachant le plomb de la toiture

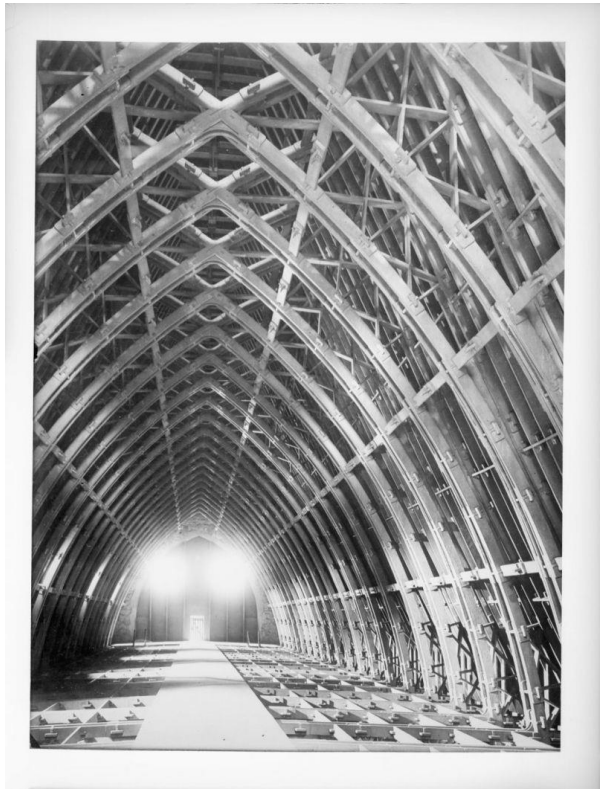
https://france3-regions.francetvinfo.fr/grand-est/marne/reims/notre-dame-paris-comment-cathedrale-reims-ete-reconstruite-apres-guerre-incendie-1914-1656042.html

Cathédrale de Reims pendant la guerre de 14-18





En 1916 par William Mitchell, Bibliothèque du Congrès.



La charpente restaurée

https://fr.wikipedia.org/wiki/Cath%C3%A9drale_Notre-Dame_de_Reims

Cathédrale de Rouen