



**HAL**  
open science

# Notre-Dame de Paris : les apports d'un chantier archéométrique interdisciplinaire à l'histoire des techniques

Philippe Dillmann

► **To cite this version:**

Philippe Dillmann. Notre-Dame de Paris : les apports d'un chantier archéométrique interdisciplinaire à l'histoire des techniques. Doctorat. SCIENCE DES MATÉRIAUX ET HISTOIRE DES TECHNIQUES, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse. 2024. hal-04629455

**HAL Id: hal-04629455**

**<https://hal.science/hal-04629455>**

Submitted on 29 Jun 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Notre-Dame de Paris : les apports d'un chantier archéométrique interdisciplinaire à l'histoire des techniques.

Ecole Thématique THEMTECH

P. Dillmann et collab.



### 15<sup>th</sup> of April 2019

- 6.55 p.m. Fire alert in Notre-Dame
- 7.26 p.m. Choir and transept reached
- 7.54 p.m. The spire fall down
- 8.00 p.m. Nave
- 9.00 p.m. North tower

### 16<sup>th</sup> of April

- 2.00 a.m. Fire extinguished



## Trois architectes et un établissement public pour un projet de restauration hors du commun



Maitrise d'oeuvre  
Philippe Villeneuve  
Pascal Prunet  
Remy Fromont

Maitrise d'ouvrage ÉTABLISSEMENT PUBLIC  
CHARGÉ DE LA CONSERVATION ET DE LA  
RESTAURATION DE LA CATHÉDRALE NOTRE-  
DAME DE PARIS

led by General Georgelin  
and Philippe Jost since 2023

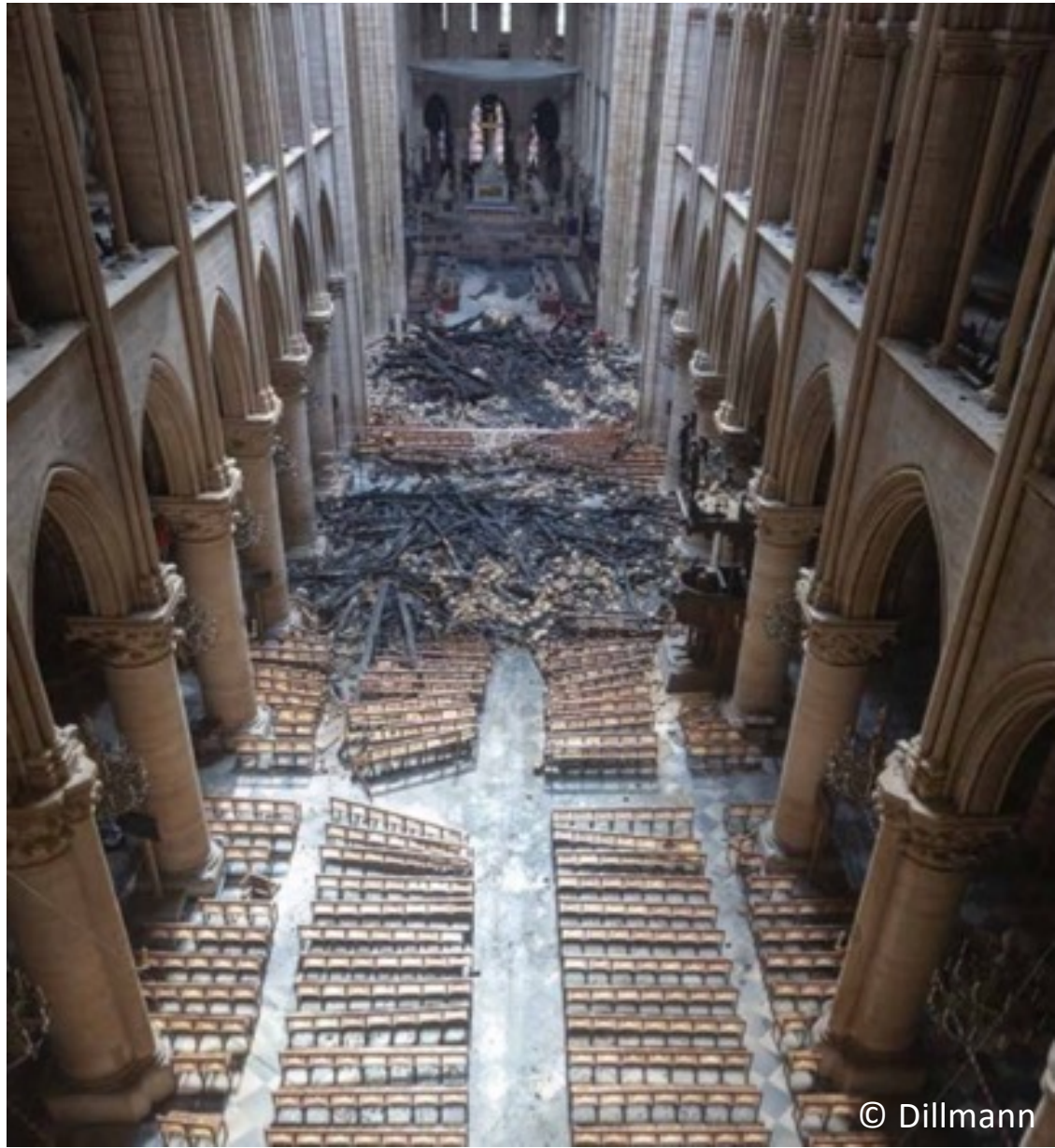
Restauration “à l’identique”

Dernier état « complet cohérent et connu »

Commission nationale du patrimoine et de l'architecture



© DRAC IDF



© Dillmann

## Des gravats aux vestiges:

Touts les éléments ont été localisés dans la cathédrale par photogrammétrie.

Un inventaire minutieux et complet a été réalisé

Une salle de stockage dédiée en banlieue parisienne



Dès le jour de l'incendie, une mobilisation des laboratoires du Ministère de la Culture



Quelques jours après le drame :



Création de l'association " Scientifiques au service de la restauration de Notre-Dame ". regroupant des scientifiques travaillant déjà sur les cathédrales gothiques en France et dans le monde

Création du chantier scientifique Notre-Dame CNRS/Ministère de la Culture  
Laboratoires de plusieurs institutions (CNRS, MC, Universités, CEA, etc.)



# Un objet interdisciplinaire

## Approches matérielles

- Restauration et conservation
- Histoires de l'art, des techniques et de l'économie (savoir-faire, provenances, etc.)
- Recherches archéologiques
- Recherches sur l'environnement

## Approches numériques

- « Jumeau » numérique
- Modélisation acoustique

## Approches anthropologiques



© DRAC IDF

9 groupes de travail

- Pierre (Yves Gallet)
- Bois (Alexa Dufraisse)
- Métal (Maxime L'Héritier)
- Verre (Claudine Loisel)
- Structure (Stéphane Morel)
- Décor monumental (Dany Sandron)
- Acoustique (Mylène Pardoën, Brian Katz)
- Emotion Mobilisation (Claudie Voissenat)
- NUMérique (Livio de Luca)

“Science for the Cathedral and  
Cathedral for science “

**nature**

[Explore content](#) ▾

[About the journal](#) ▾

[Publish with us](#) ▾

[Subscribe](#)

[nature](#) > [news](#) > article

NEWS | 08 January 2020

## **The huge scientific effort to study Notre-Dame's ashes**

# Prospections archéologiques et fouilles de sauvetage

Inrap<sup>+</sup>



*Liberté • Égalité • Fraternité*

**RÉPUBLIQUE FRANÇAISE**

Ministère de la Culture



Fragments du Jubé

## ***Traces d'outils présentes sur les parements du vaisseau central de la nef***

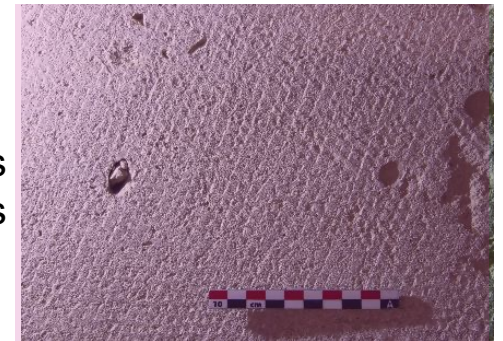
## **L'apport de l'étude des maçonneries à la chronologie de la nef**

Élévation nord  
de la nef

Traces de lames  
droites



Traces de lames  
dentées



Élévation sud  
de la nef

Traces de lames  
dentées en pluie  
d'impacts



## ***Marques lapidaires présentes sur les arcatures des tribunes***

## **L'apport de l'étude des maçonneries à la chronologie de la nef**

Répertoire des marques  
lapidaires gravées sur les  
arcatures des tribunes  
© *Cédric Moulis*

Exemple de  
marque lapidaire  
© *Cédric Moulis*



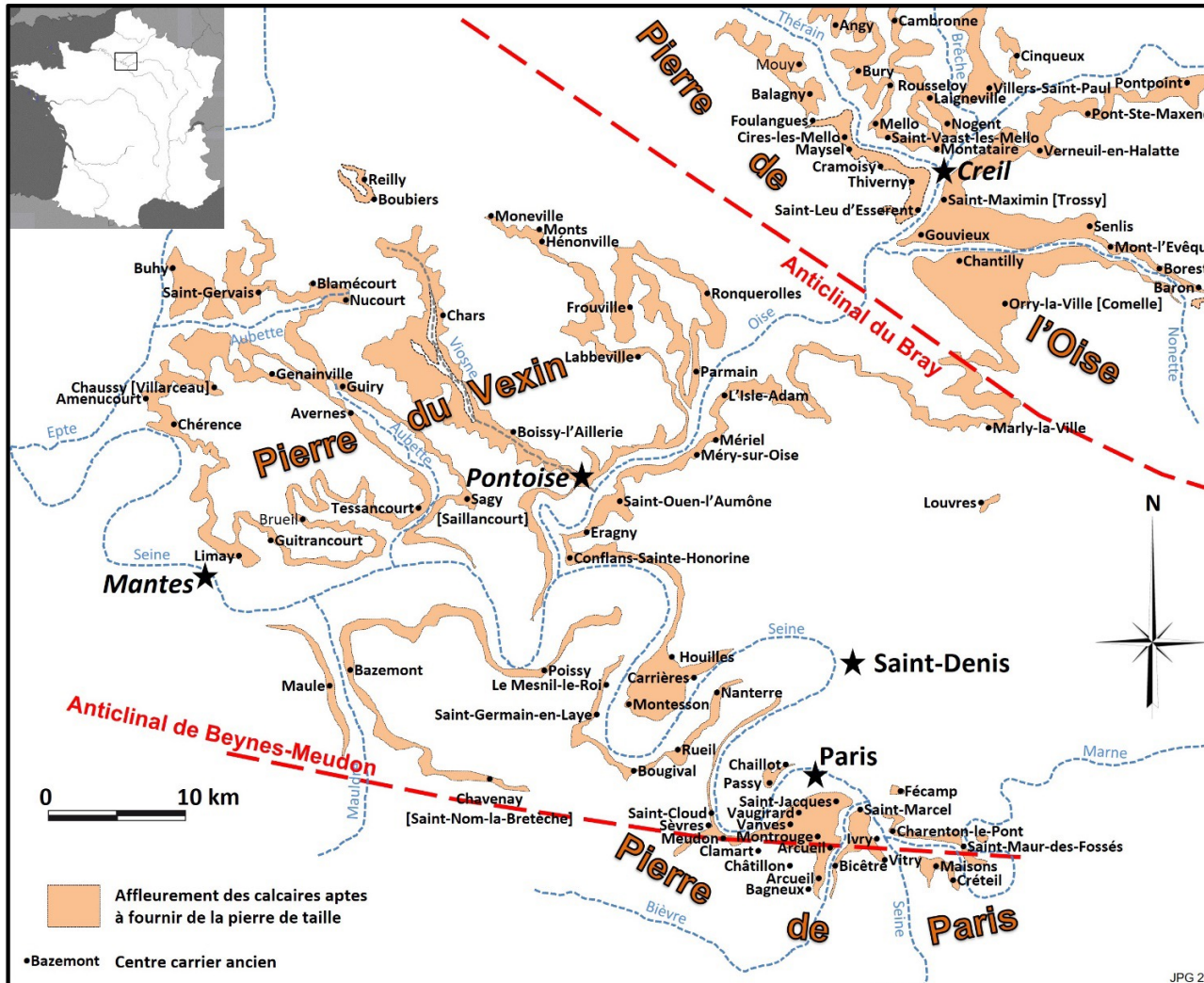
Signes lapidaires gravés sur les baies des tribunes ouvrant sur le vaisseau central  
© *Cédric Moulis*

Contrôles macroscopiques *in situ* et prélèvements représentatifs pour la caractérisation pétrographique (minéralogie, contenu en microfossiles,...) et pétrophysique en laboratoire.

© L. LEROUX ET J.-P. GELY 2024



## Bassins carriers et centres carriers du Calcaire grossier du Lutétien



Pour l'essentiel, des calcaires du Lutétien marin (Série Eocène « moyen » - Ere Cénozoïque),

A l'origine (époque médiévale), extraites du sous-sol parisien, de la série des Bancs Francs (Lutétien supérieur) et des Lambourdes s.l. (Lutétien moyen)

Au cours des siècles suivants, issues de carrières de plus en plus éloignées de Paris, du fait de gisements originels épuisés ou devenus inaccessibles (urbanisation,...) :

- Recours massif à des pierres de remplacement, de Petite puis Grande Couronne, puis de Picardie (Oise, Aisne)
- Recours ciblé et limité à des pierres de substitution, d'autres bassins calcaires français, à partir du XIXe siècle

## Observation du mur bahut du chœur

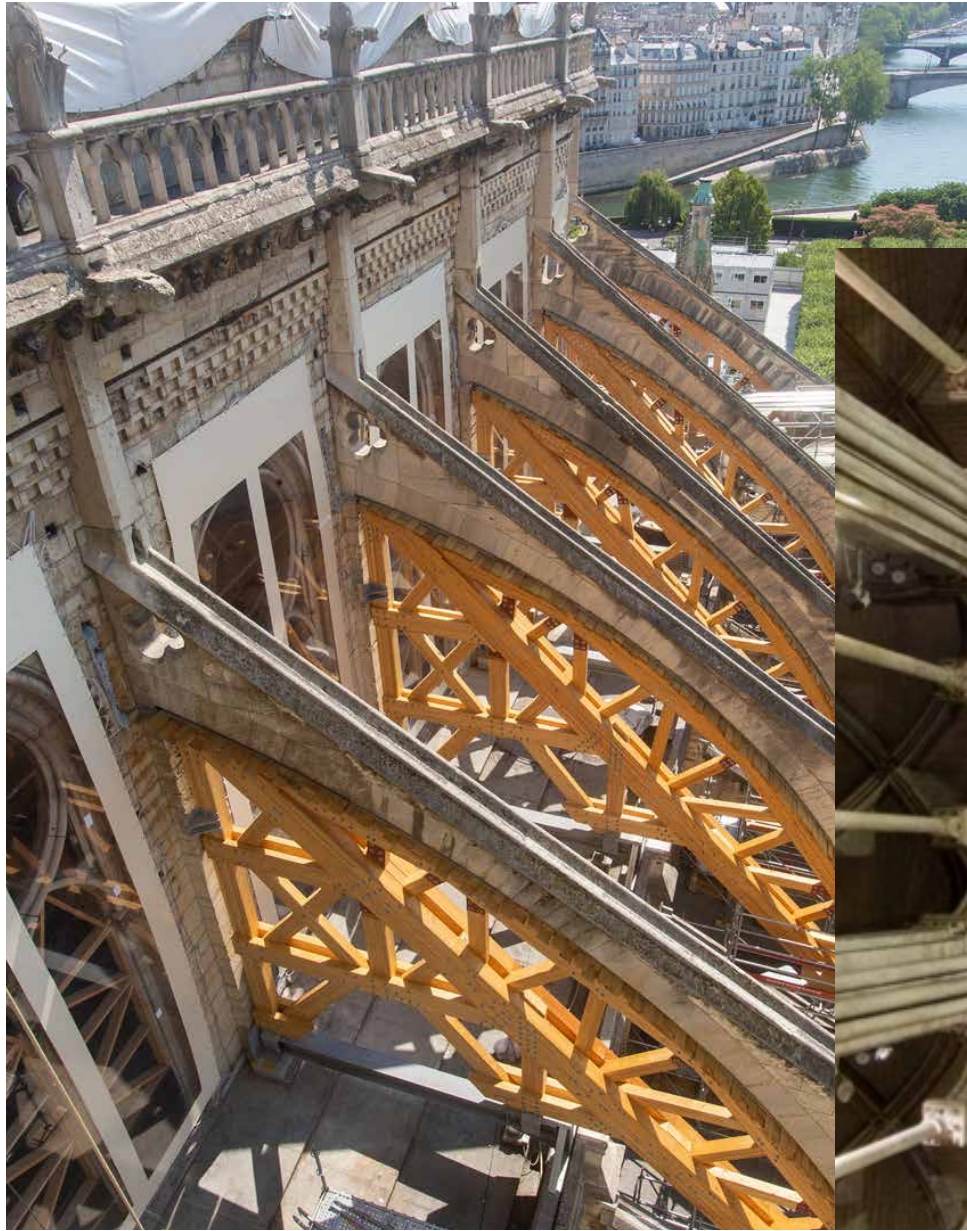
---



Chœur, rond-point

© LRMH  
Hétérogénéité des modules des blocs et des types de pierre et de provenance : réemploi d'éléments issus d'autres construction médiévales





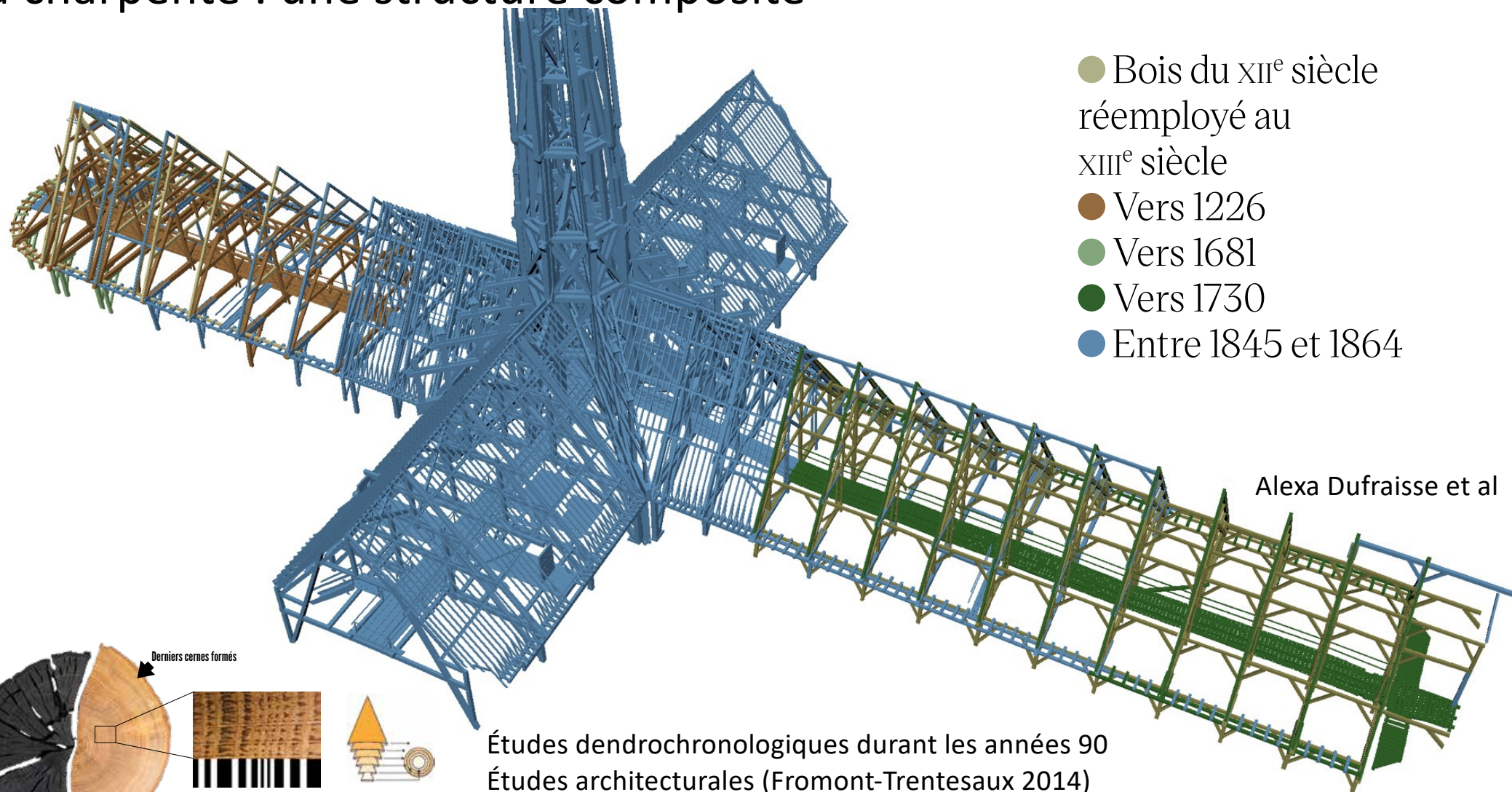
Voûtes de 33 m de hauteur  
Épaisseur : 12 cm dans le chœur, 19 cm dans la nef.

Cathédrale de Sens : 35 cm d'épaisseur pour 24 m de hauteur



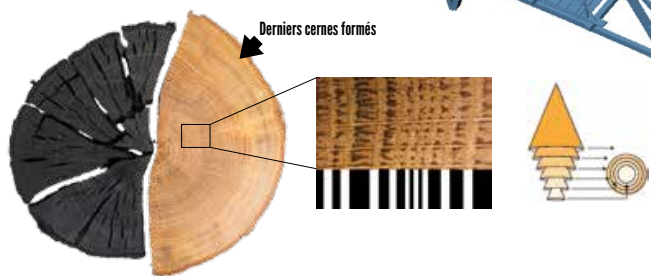
GT structure : S. Morel et al

# La charpente : une structure composite



- Bois du XII<sup>e</sup> siècle réemployé au XIII<sup>e</sup> siècle
- Vers 1226
- Vers 1681
- Vers 1730
- Entre 1845 et 1864

Alexa Dufraisse et al



Études dendrochronologiques durant les années 90  
Études architecturales (Fromont-Trentesaux 2014)

© GT Bois Alexa Dufraisse et al



Possibilité d'étudier les restes carbonisés  
(plus de 10000 pièces)

Des protocoles spécifiques ont été mis en  
place



# Dendrochronologie et archéologie

## Dates abattage

**Anna Imbert Stule** (thèse MITI) sous la codirection d'A. **Dufraise, A. Pozswa, T.-T. Thuy Nguyen Tu**, avec la collaboration de **J. Bouchez, J.-L. Dupouey, S. Ponton.**  
*Les déplacements ont été financés par la MITI et CASIMODO, les analyses chimiques des bois et des sols par CASIMODO et ENGIE*

© O. Girardclos, work in progress

- 800 à 1000 chênes (30 cm de diamètre) ; moins de 14 m de long
- Jeunes arbres (moins de 120 ans)
- Utilisation de bois vert (Certains arbres ont été abattus en 1185 - première cérémonie en 1183)

© GT Bois Alexa Dufraise et al

## Etude archéologique: marques de flottage sur les bois du XIIe siècle J.Y. Hunot

- 9 bois avec indices liés à la confection de radeaux pour le transport par flottage
- Répartis sur les différentes phases de construction de la nef et du chœur

N°5501-Extrait ferme N03  
abattage vers 1290  
Trous obliques sur une arête,  
Cheville avec prisonnier  
sans lien avec un assemblage de la charpente  
© Jean-Yves Hunot



Flottage Haut-Rhin vers 1600 ( Pottecher 2008)

Études dendrochimiques et isotopiques pour déterminer la provenance  
- création d'une méthodologie pour le bois carbonisé

Mn/Ca, Sr/Ca,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,

ANR QUASIMODO, dir A. Dufraisse

**Anna Imbert Stulc (thèse CNRS MITI) sous la codirection  
d'A. Dufraisse, A. Pozswa, T.-T. Thuy Nguyen Tu, avec la  
collaboration de J. Bouchez, J.-L. Dupouey, S. Ponton.  
*Financements CNRS MITI et CASIMODO, ENGIE***

Mise en place d'une base de données de  
référence pour la composition des sols des  
forêts d'Ile de France

© GT Bois Alexa Dufraisse et al

## Les usages du plomb au Moyen Âge

© Daussy, D., Baron, S.,  
Sarah, G., Lestel, L., Azéma, A., L'Héritier, M.

Une couverture en plomb dès la fin du XIIe siècle

Don de 100 £ de Maurice de Sully dans son testament en 1196 *ad tectum novæ fabricæ faciendum plumbeum*

Une première flèche (mi XIIIe s.)

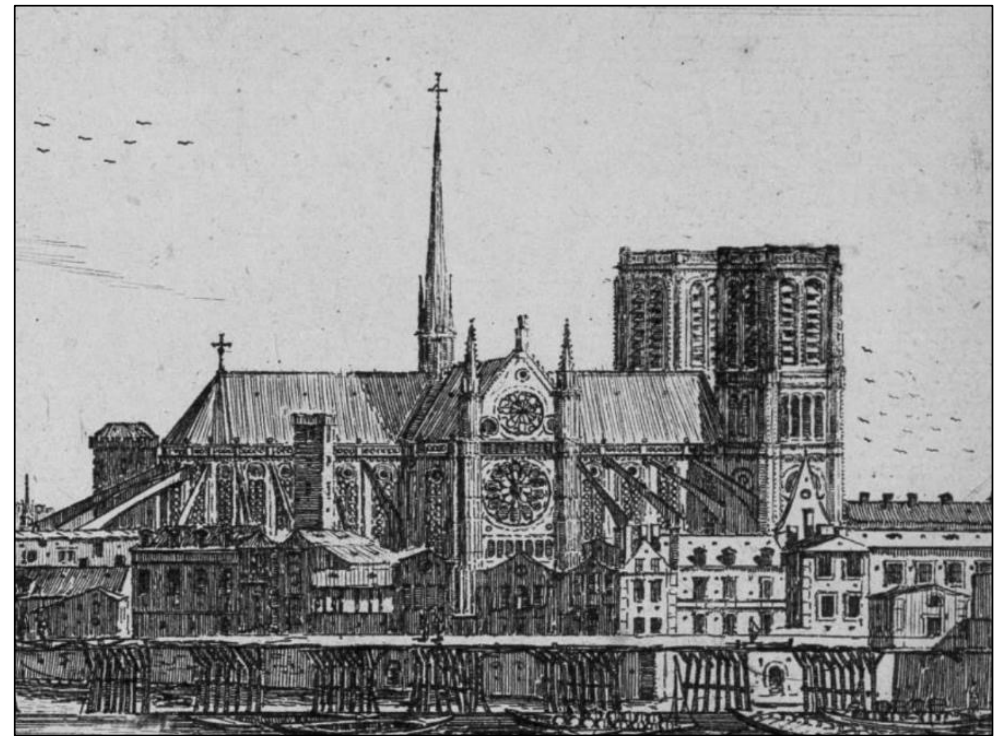
Des représentations médiévales



Jean Fouquet, *Livre d'heures d'Etienne Chevalier*, XVe.s.



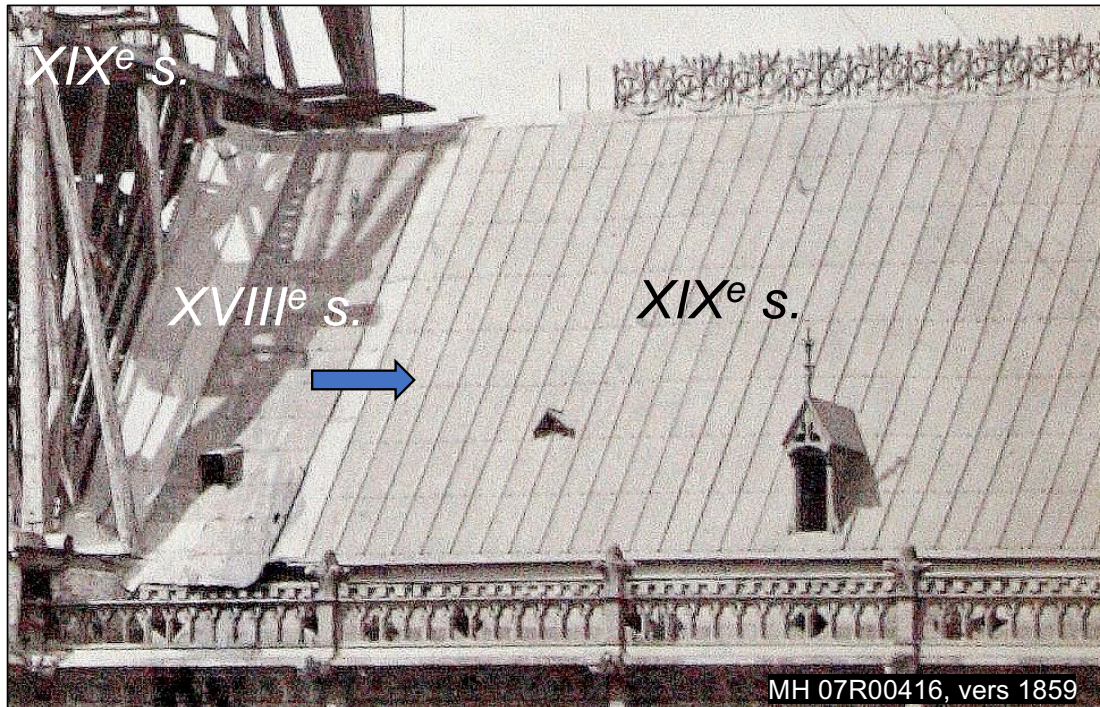
Froissart, *Chroniques*, XVe.s.



Silvestre Israël, avant 1655



## La couverture en plomb du XIX<sup>e</sup> siècle



« 1<sup>e</sup> couverture » (fin XIIe-XIIIe s.)



« 2<sup>e</sup> couverture » (vers 1720)

**Pose horizontale**

$H = 0,975 \text{ m}$  ;  $L = 3,248 \text{ m}$  ;  $E = 5 \text{ mm}$

+

1<sup>ère</sup> flèche (démontée en 1793)

(Cardinal de Noailles)



« 3<sup>e</sup> couverture » (à partir de 1850)

(~224 t)

**Pose verticale**

$H = 0,80 \text{ m}$  ;  $L = 1,50 \text{ m}$  ;  $E = 3 \text{ mm (moy.)}$

+

2<sup>e</sup> flèche (~30-100 t) + 1<sup>ère</sup> crête (30 t)

+

Couverture de la sacristie (1848)

(Travaux de E. Viollet-le-Duc)

## Les usages du plomb au Moyen Âge

Le scellement des fers



Les plombs de vitraux



## Un matériau plastique

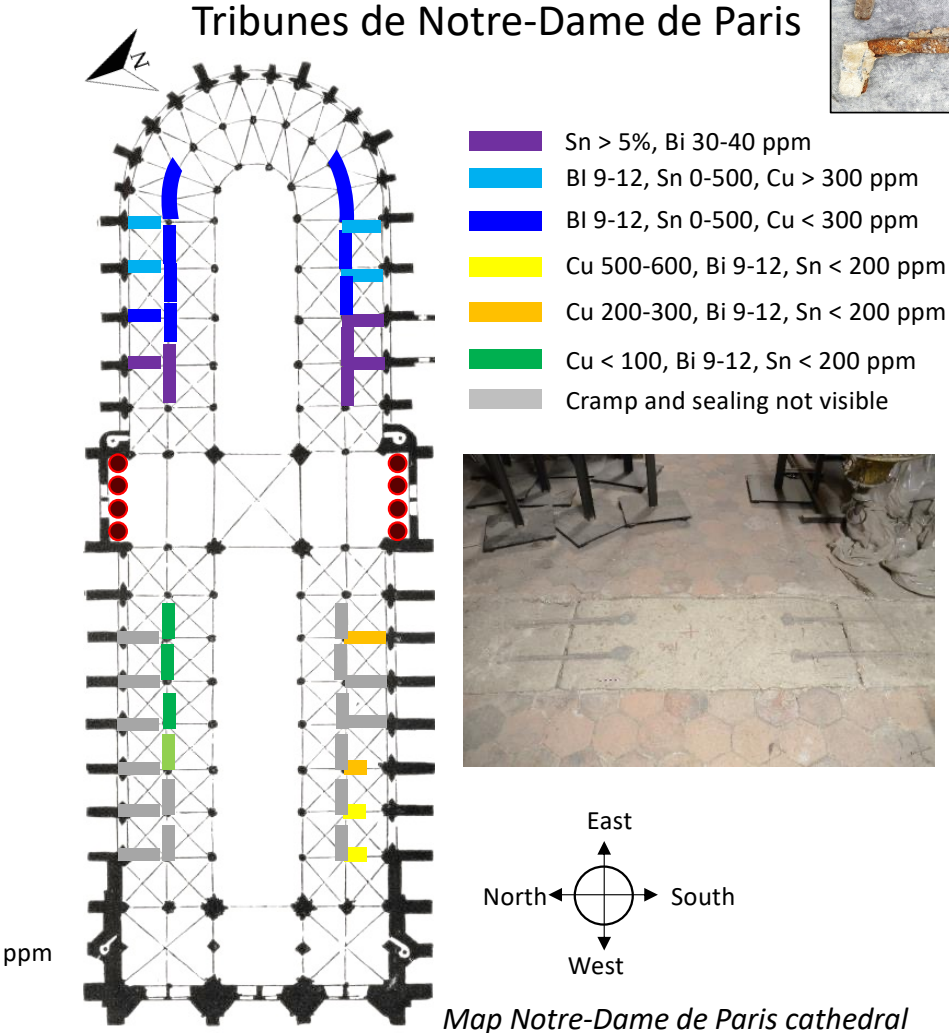
Scellement des pierres et absorption des contraintes



# Scellements de plomb - Analyses chimiques (phasage du chantier)

## ➤ Analyses chimiques

- Multi élémentaires (Ni, Cu, As, Ag, Cd, Sn, Sb, Au & Bi)



## Utilisation de plomb recyclé (forte teneur en étain)

- Grand comble : ~ 4000 ppm Sn  
=> intégration soudures par recyclage
- Sacristie : grande variabilité. Les textes évoquent le emploi d'une partie des tables de l'ancienne sacristie
- Refonte de vieux plomb pour tous usages (tuyaux, tables, chéneaux, gargouilles...) mélangé ou non au neuf, moins coûteux quel que soit le cours du plomb

# Provenance du Pb : Analyses Isotopiques

## Origines des sources du plomb au XIXe siècle

- Sources économiques : plomb neuf d'origine espagnole
  - Plomb de Murcie (Carthagène) exporté dès 1840-1845 (scories)
  - Plomb de La Carolina (Linares) exporté à partir de 1860
- Traité de libre échange avec l'Angleterre en 1860 => le plomb exporté d'Angleterre est d'origine espagnole

## Les usages du fer au XIXe siècle



## Des renforcements de la maçonnerie

Chaînages et tirants mis en œuvre par Lassus et Viollet-le-Duc



© Mathilde Bernard



Tirant chœur, intérieur



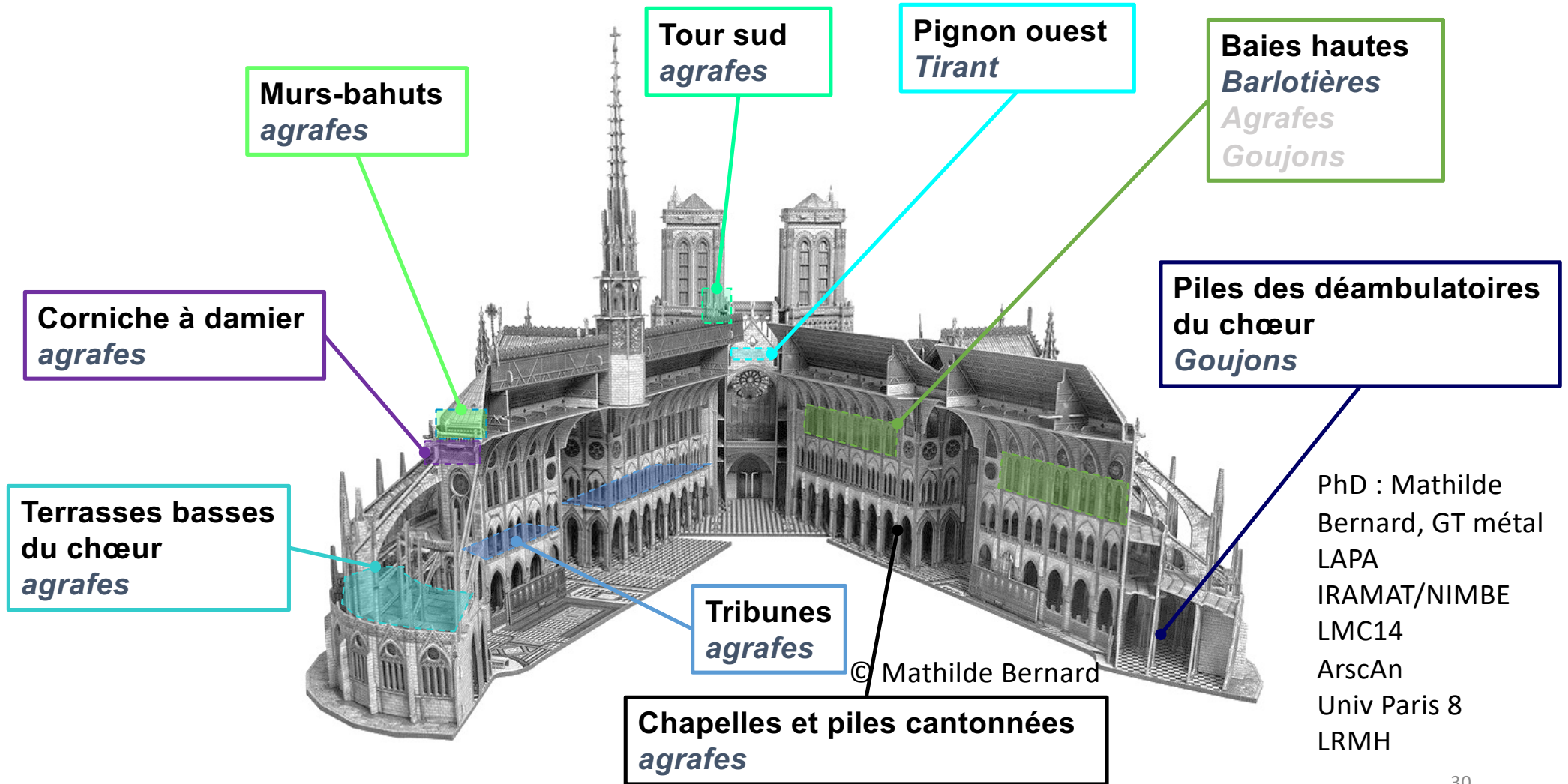
Tourelle pignon sud



Tirant pignon sud

# Le fer à Notre-Dame (Thèse Mathilde Bernard)

⋮

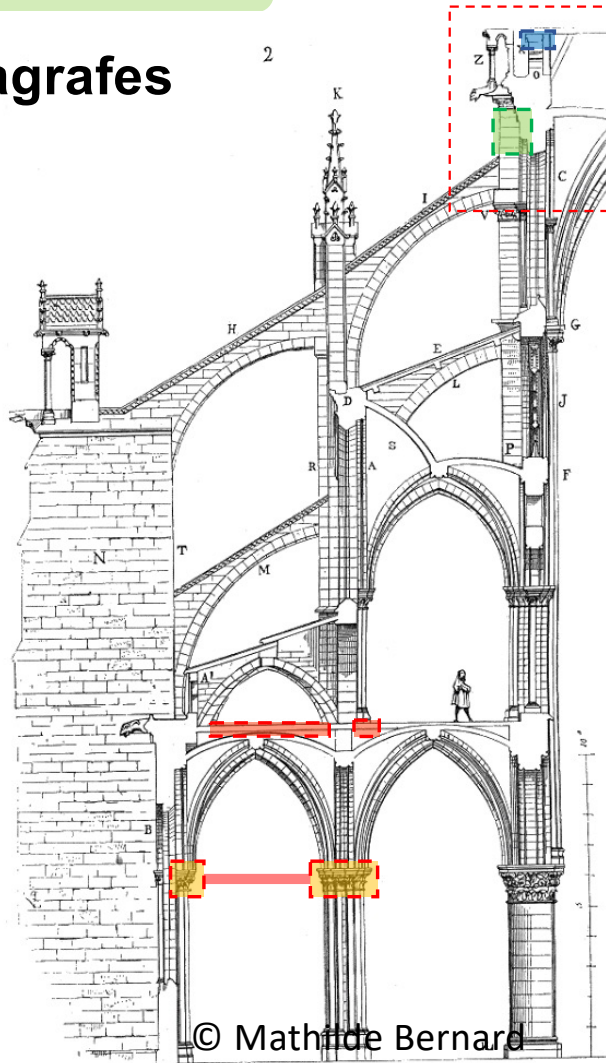


# Les armatures de fer médiévales

## Plusieurs séries d'agrafes



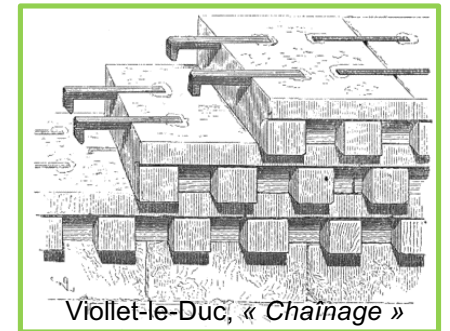
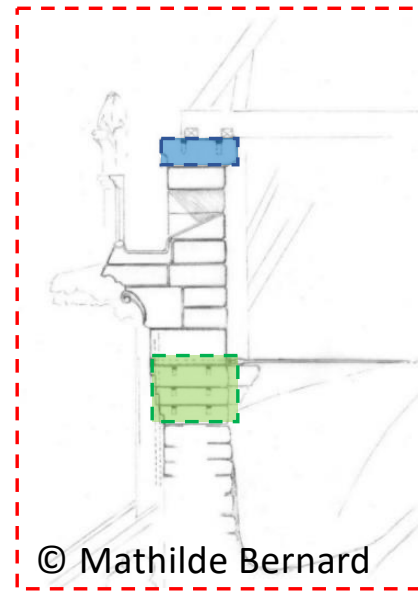
Tirant de bois et goujon de fer



D'après Viollet-le-Duc, *Dictionnaire raisonné*

## Un matériau structurel

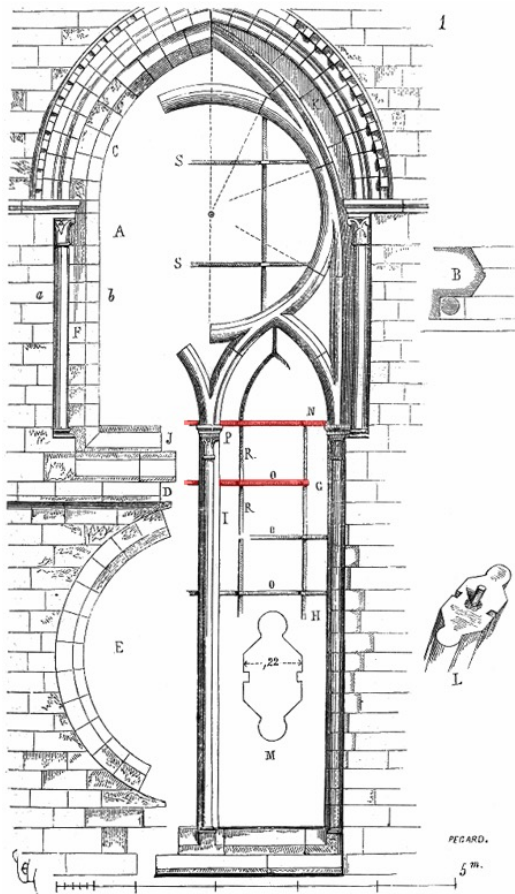
Chœur et élévation est des transepts, P. Villeneuve, R. Fromont, P. Prunet, juin 2020





# Les armatures de fer médiévales

Fers à vitraux : petites et grosses barlotières



Barlotières des baies hautes, *Dict. raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, E. Viollet-le-Duc, 1854-1868



© Mathilde Bernard©



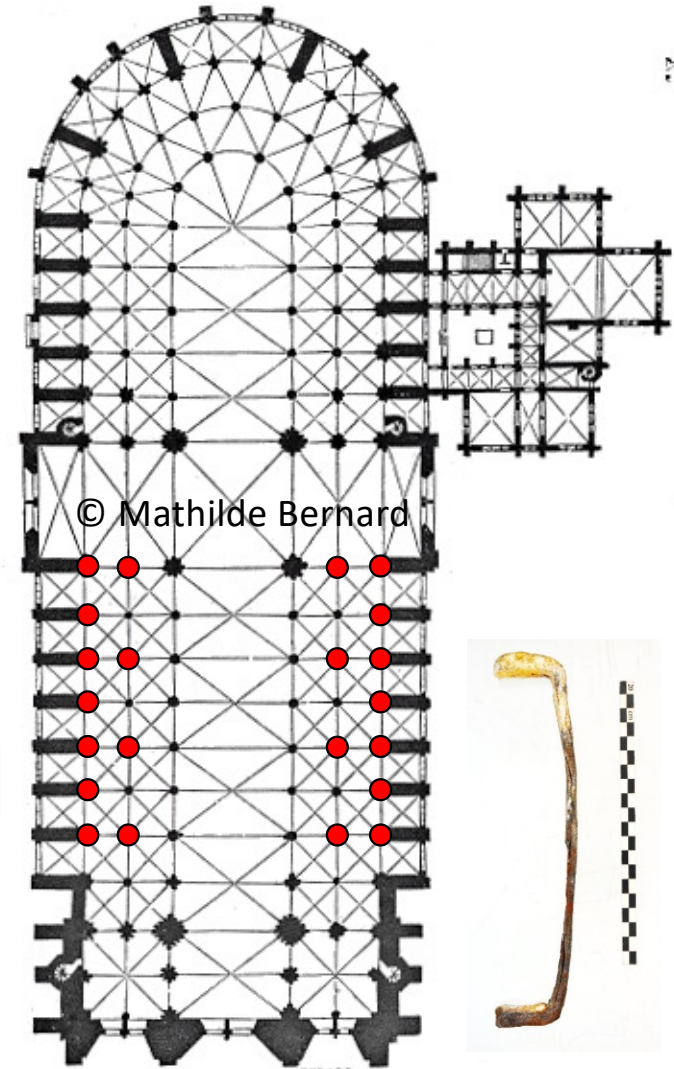
© Mathilde Bernard©

Vestiges des anciennes barlotières

Attache des éléments en délit (nef)



16 cm  $\phi$  , 4 m haut

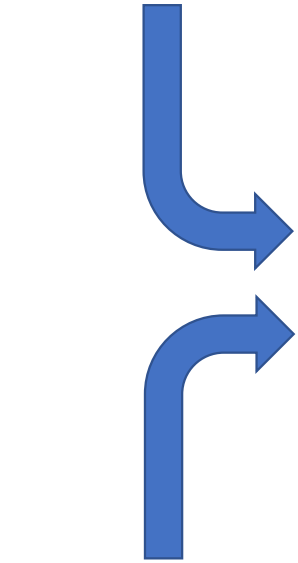


© Mathilde Bernard





Iron ore



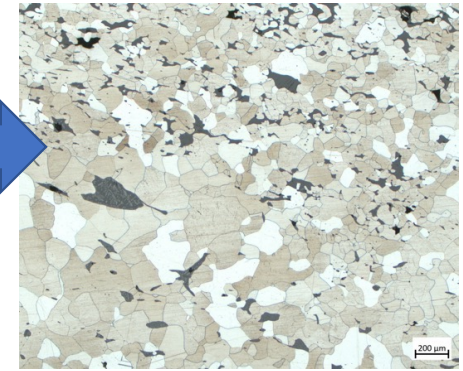
Charcoal



Smelting

$T < T_{\text{melt Iron}}$

Iron crude mass



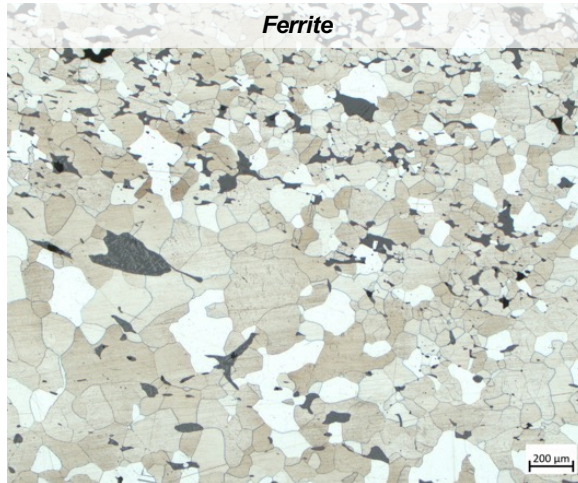
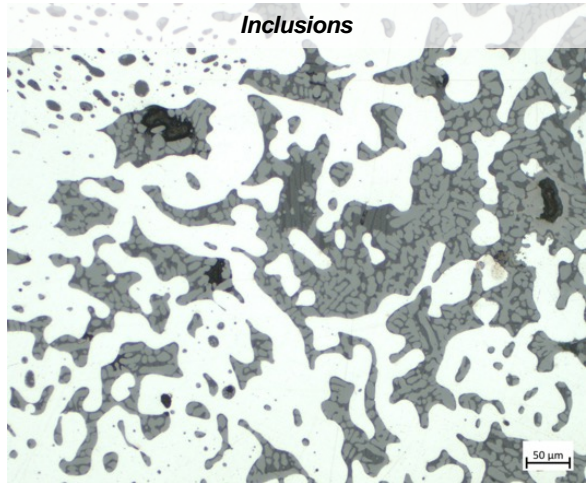
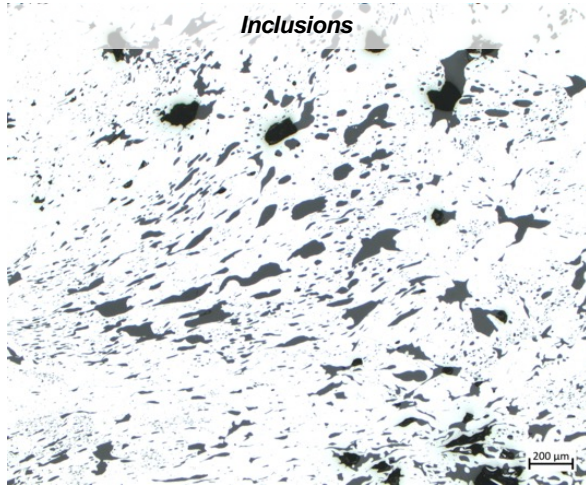
Artefact



slag



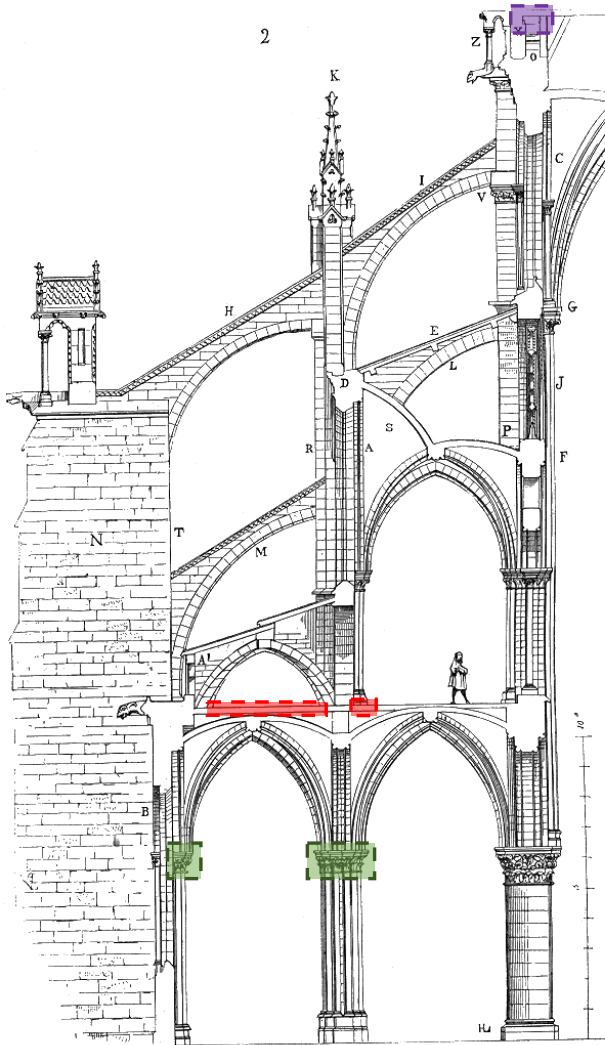
# Heterogenous microstructures



## Radiocarbon dating of the steel

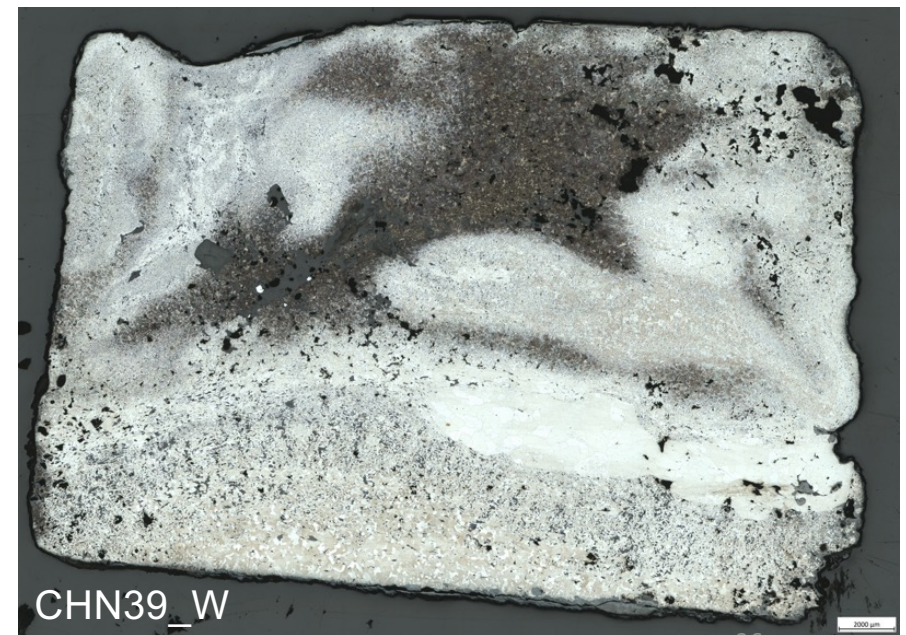
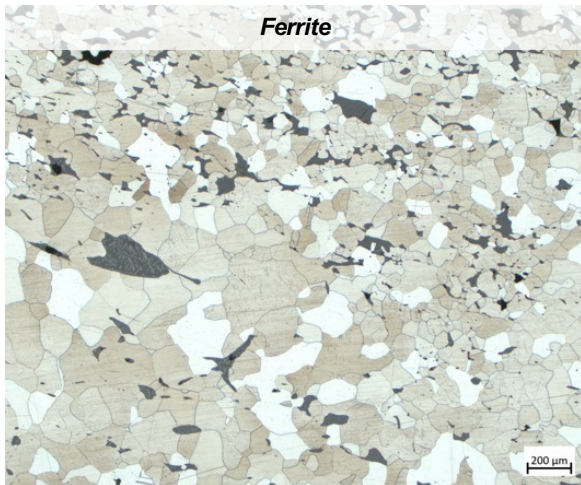
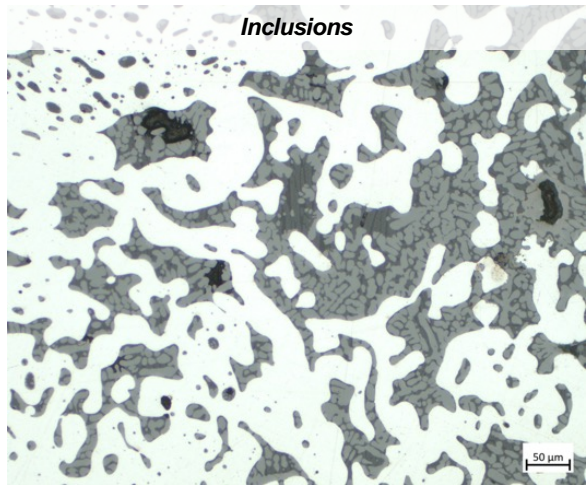
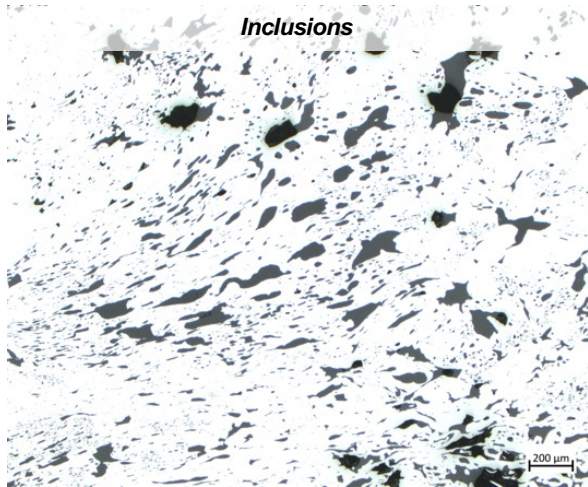
Collaboration LAPA/NIMBE + LMC14/LSCE

Compatibilité avec le Moyen-Age

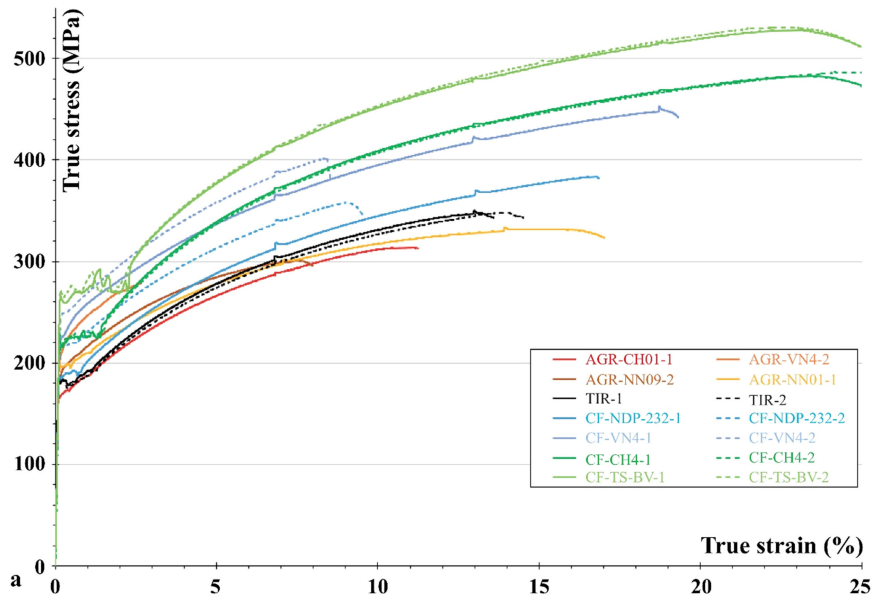


Coupe de Notre-Dame de Paris, *Dict. raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, E. Viollet-le-Duc, 1854-1868

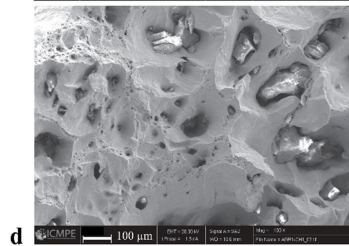
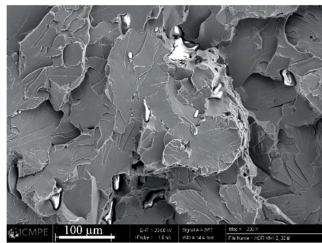
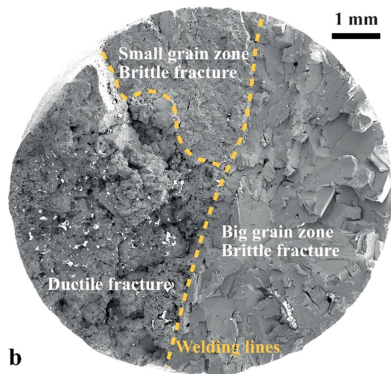
# Heterogenous microstructures



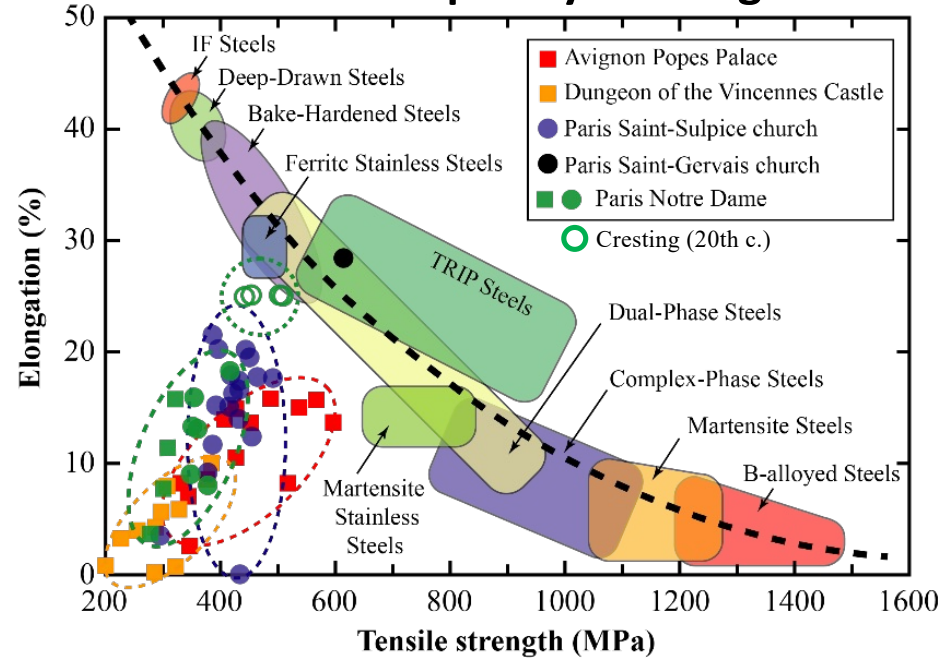
# Mechanical behaviour – tensile tests



Fracture surface AGR-VN4



## Limited mechanical properties similar to contemporary buildings

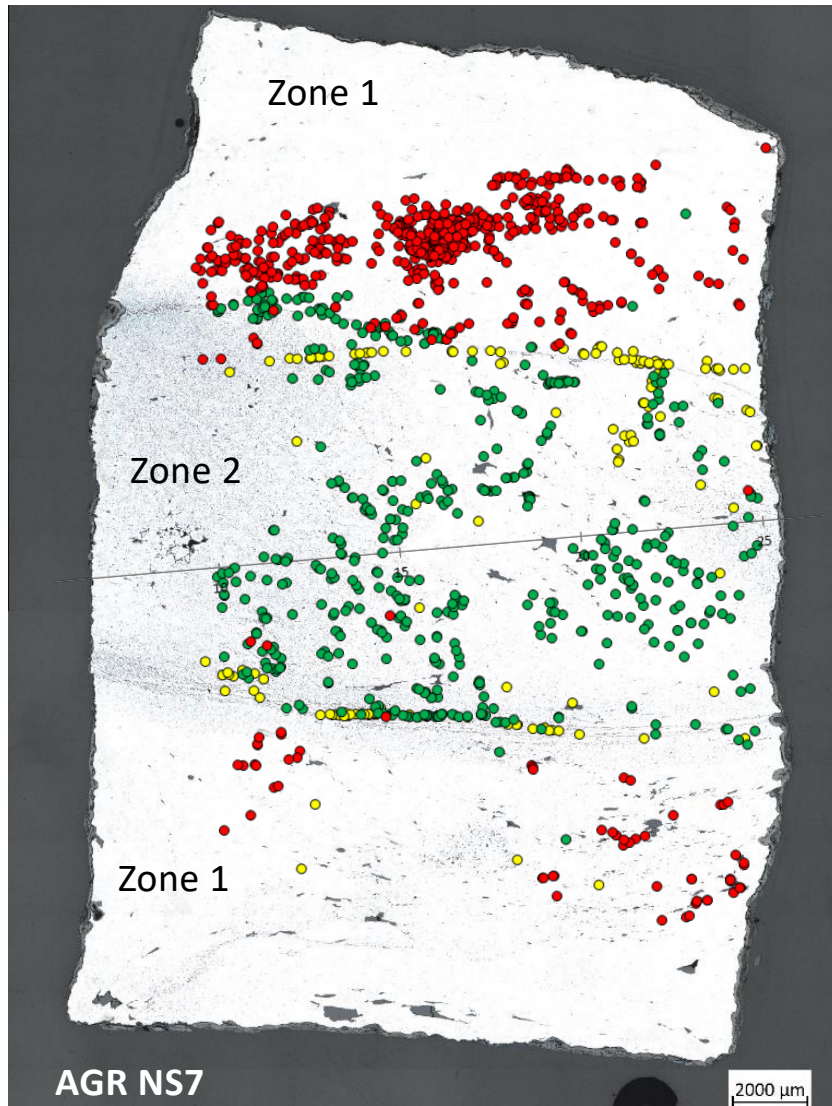


Young's modulus is comprised between 185 and 215 GPa

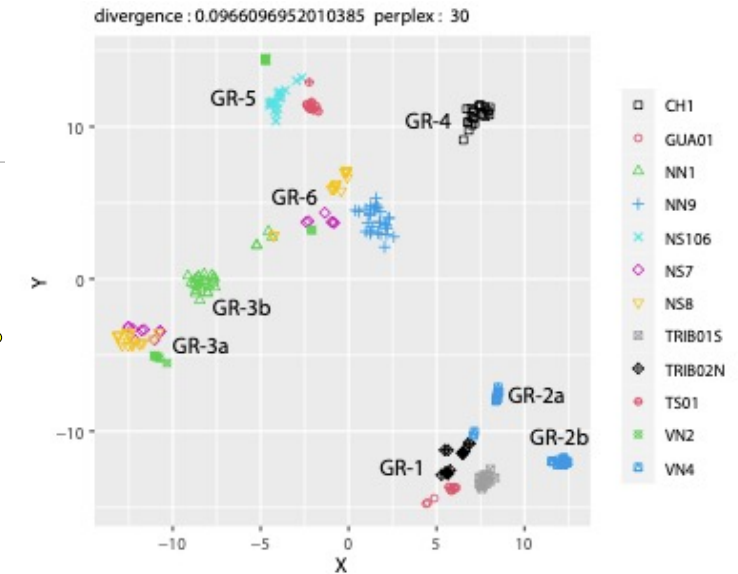
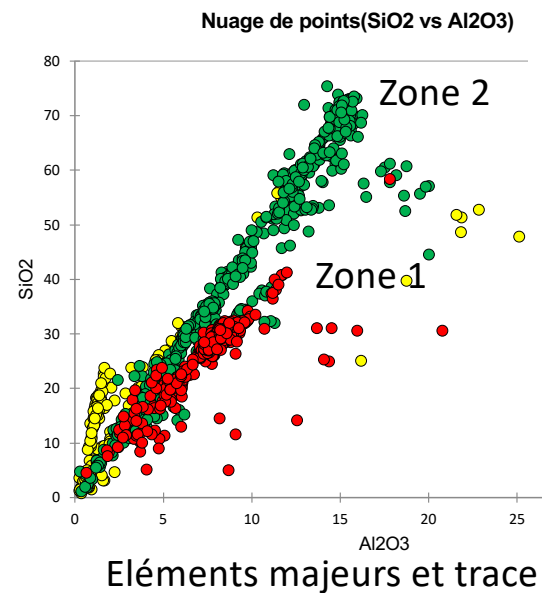
Fractures are usually ductile yet some samples present brittle transgranular and intergranular fracture, due to the presence of phosphorus

I Guillot  
ICMPE  
L'héritier et al  
International Journal of Architectural Heritage  
2019

# Composition des inclusions de scorie



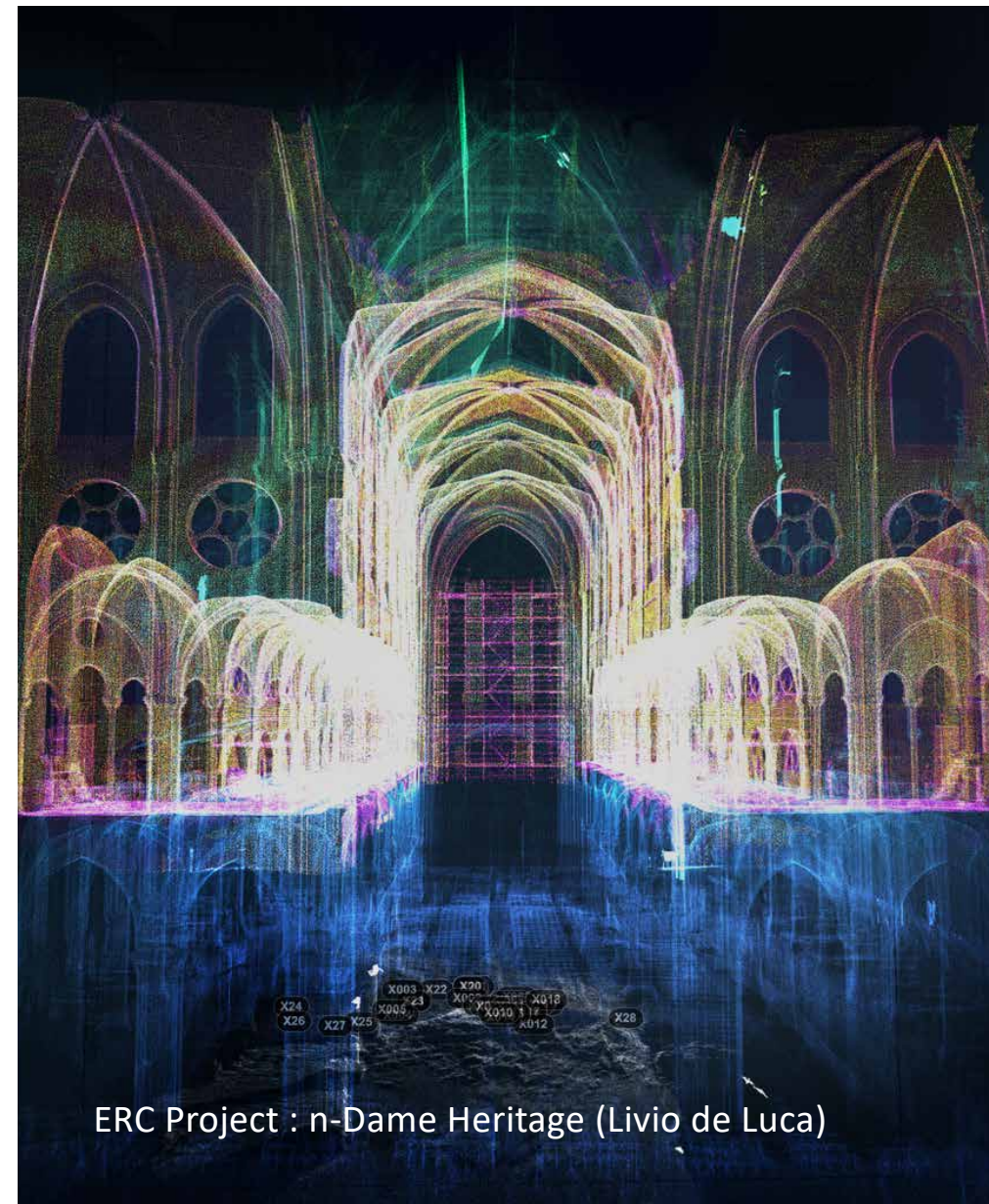
Différents groupes de composition dans une même agrafe  
Origines différentes  
Recyclage ?



L'Héritier et al, Plos One, 2022

# Digital twin of Notre-Dame

- Building a cathedral of knowledge
- Objectives
  - *analysis and memorisation* of the scientific activities carried on a multidisciplinary object
- A digital ecosystem to document the construction site
- Storage platform for all types of already existing data
  - Adapted protocols
  - tens of thousands of files from cultural institutions, laboratories, or companies in the conservation-restoration sector.
  - Data enrichment and correlation
- Integrating new data produced by the scientific yard
  - Semantic issues
  - Data correlation issues
  - Technology gap (analysing different kind of data – written sources, 3D annotation etc)
- Explore the way all interdisciplinary actors (scientists, architects, etc) interact to generate data and science

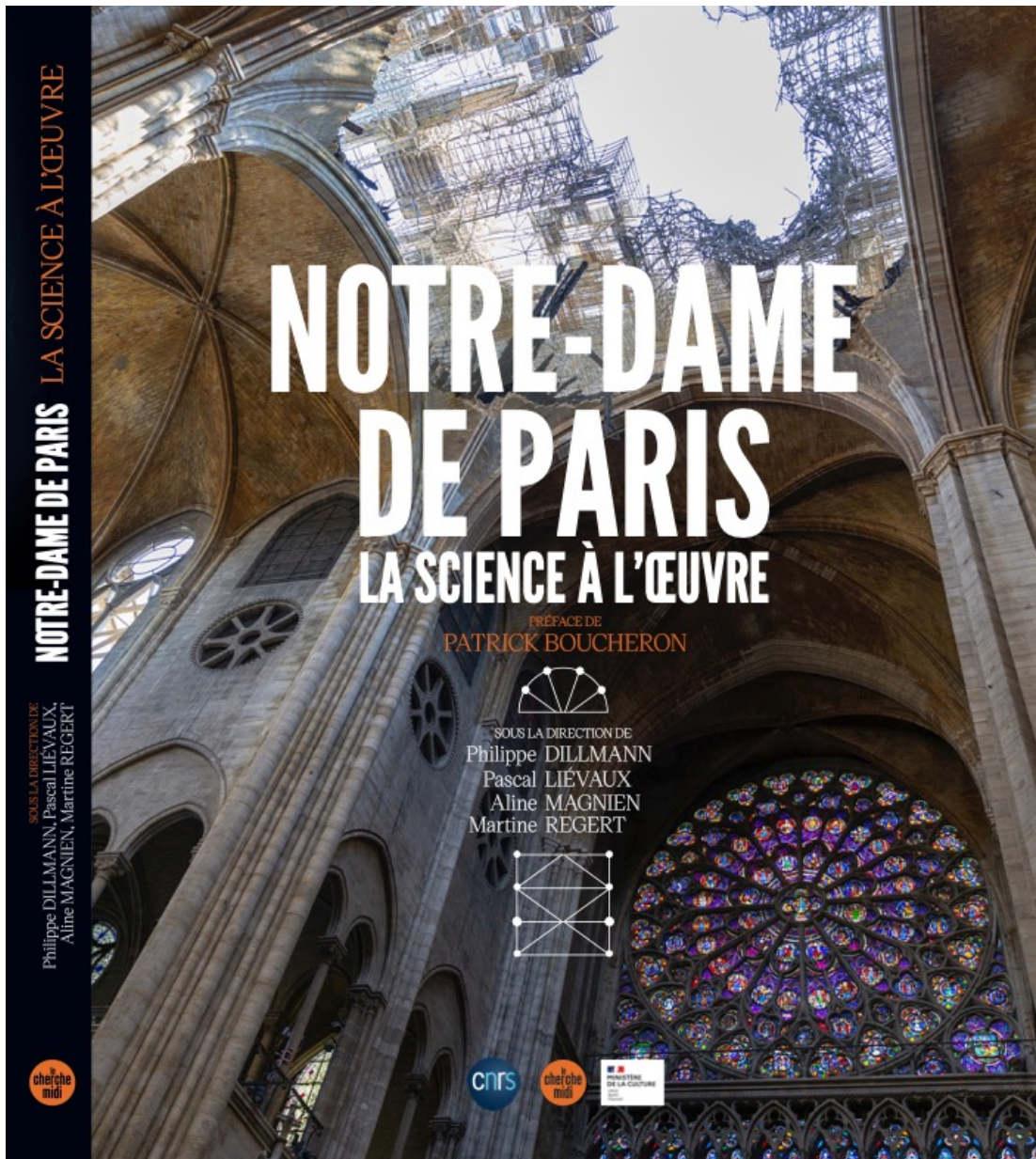


ERC Project : n-Dame Heritage (Livio de Luca)



The future : a key date 8<sup>th</sup> of December 2024  
the re-opening of the cathedral





Free access until July