



HAL
open science

Le fer à Notre-Dame de Paris : nature des alliages, procédés techniques et études de provenance, le cas des fenêtres hautes

Mathilde Bernard, Maxime L'Héritier, Lucile Beck, Emmanuelle Delque-Količ, Aurélia Azéma, Philippe Lorquet, Sylvain Bauvais, Jean-Charles Méaudre, Philippe Dillmann

► To cite this version:

Mathilde Bernard, Maxime L'Héritier, Lucile Beck, Emmanuelle Delque-Količ, Aurélia Azéma, et al.. Le fer à Notre-Dame de Paris : nature des alliages, procédés techniques et études de provenance, le cas des fenêtres hautes. 24ème édition d'Archéométrie - Colloque du GMPCA, Apr 2023, Nice, France. hal-04270277

HAL Id: hal-04270277

<https://hal.science/hal-04270277>

Submitted on 3 Nov 2023

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.

Le fer à Notre-Dame de Paris : nature des alliages, procédés techniques et études de provenance, le cas des fenêtres hautes

Mathilde Bernard¹, Maxime L'Héritier², Lucile Beck³, Emmanuelle Delqué-Kolic³, Aurélia Azéma⁴, Philippe Lorquet⁵, Sylvain Bauvais⁶, Jean-Charles Méaudre¹, Philippe Dillmann¹

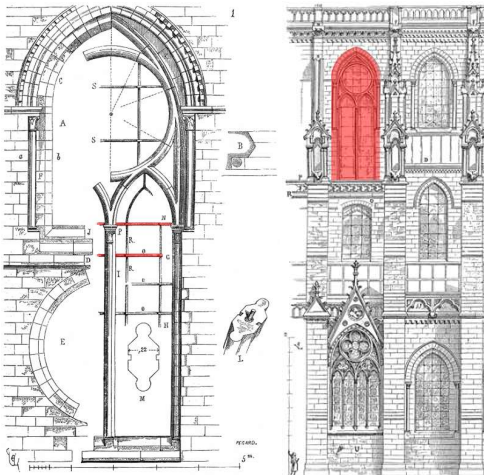
¹ LAPA, IRAMAT UMR7065, NIMBE UMR3685, Université Paris-Saclay, CEA/CNRS
² Université Paris 8, ArScAn UMR7041, CNRS

³ LMC14, LSCCE-IPSL, CNRS/CEA/UVSQ
⁴ LRMH, CRC UAR3224, MNHN

⁵ INRAP
⁶ CRFJ, UMIFRE n°7, UAR3132, CNRS/MEAE

Contexte

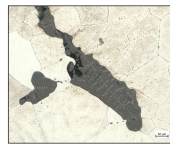
Suite à l'incendie de Notre-Dame de Paris, la mise en place d'échafaudages pour la restauration offre un accès unique à des endroits de la cathédrale qui étaient inaccessibles jusqu'à présent. Ceci a permis de révéler une grande diversité d'usages du mobilier ferreux dans la structure de l'édifice. Parmi ces différents éléments, d'anciennes barres de vitraux des baies hautes de la cathédrale, aujourd'hui supprimées, mais dont subsistent quelques vestiges dans le meneau central des fenêtres, constituant un de nos corpus d'étude. Ces barres transversales, mesurant à l'origine plusieurs mètres de long et d'une section d'environ 3,5 x 4 cm, sont des objets ferreux n'ayant jamais été étudiés auparavant dans un tel édifice car ils sont, le plus souvent rarement accessibles.



Fenêtres hautes de Notre-Dame de Paris, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIIe siècle*, Eugène Viollet-le-Duc, Édition BANCE – MOREL, de 1854 à 1868

Provenance du métal

Composition chimique des matériaux



Inclusions des barres de vitraux

- MEB-EDS
- LA-IPC-MS



Scories de sites sidérurgiques en Île-de-France

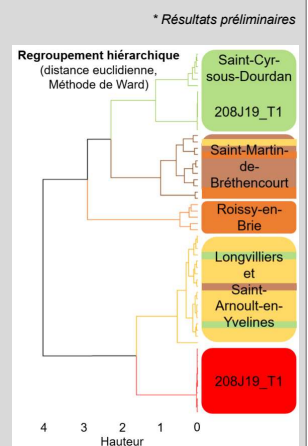
- ICP-OES
- IPC-MS

Comparaison des signatures géochimiques

Statistiques multivariées :
➢ ACP
➢ CAH

Transformation des données par la méthode des Log-Ratio

$$X_{ij} = \log\left(\frac{x_{ij}}{g(x_i)}\right)$$



X_{ij} : valeur transformée pour chaque variable pour la composition i ; x_{ij} : valeur de chaque variable (ici concentration) pour la composition i ; $g(x_i)$: moyenne géométrique de l'ensemble des variables considérées pour la composition i
* Logarithme népérien

Procédés de fabrication

Mise en forme des barres de fer

Encoches visibles sur certaines barres



Hypothèses :

- Réemploi d'anciennes barres avec mortaises pour les barlotières de vitraux
- Fabrication « industrielle » de certaines barres pouvant servir pour d'autres fonctions dans la cathédrale

NOTRE-DAME-DE-PARIS - BAIE HAUTE 208 - 208J20
Masse : 1780 g / Volume : 235 cm³
Crédits : J.-C. Méaudre

Un exemple de recyclage ?

Examen métallographique

- Lignes de soudures
- Microstructures différentes

Analyses élémentaires des inclusions

- MEB-EDS

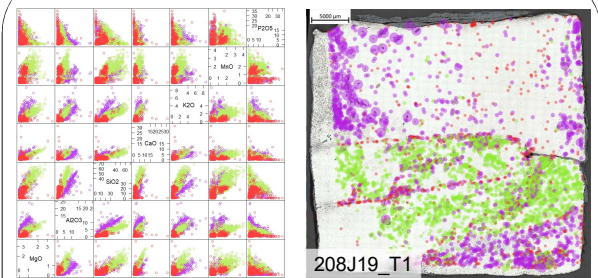
Classification des inclusions

- Transformation des données (Log-Ratio)
- CAH

Normalisation des données par la surface et discrimination des filières direct et indirect

$$\%E^* = \sum_{i=1}^n \left(\%E_i^* \times \frac{S_i}{S_t} \right)$$

Interprétation des classes d'inclusions



- Inclusions de réduction du minerai de fer
- Inclusions de forge et « effet pépite »

$\%E^*$: teneur pondérée de l'élément considéré (oxyde) ; $\%E_i^*$: pourcentage massique de l'élément considéré (oxyde) dans l'inclusion numéro i ; S_i : surface de l'inclusion considérée ; S_t : surface totale occupée par les inclusions ; n : nombre total d'inclusions

Chronologie

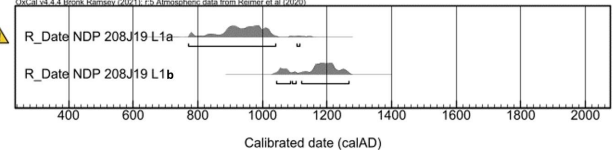
Datation au radiocarbone

- Échantillonnage sur les zones les plus carburées
- 0,5 à 1 mg de carbone



⚠ Masse de carbone prélevée faible : $m = 0,12 \text{ mg}$

⚠ OxCAL v4.4.4 Bronk Rameney (2021) ; ± 5 Atmospheric data from Reimer et al (2020)



Conclusion

- ❖ Les analyses préliminaires pour les études de provenance semblent montrer qu'aucune des barres de vitraux analysées n'appartient à un des sites sidérurgiques d'Île-de-France étudiés jusqu'à présent. Cependant, des signatures chimiques proches peuvent être observées, comme il en est le cas pour la barlotière de la fenêtre haute n°208 du chœur avec le site de Saint-Cyr-sous-Dourdan.
- ❖ L'étude de provenance de ce même échantillon, couplée avec les analyses métallographiques, montre également la présence de deux types d'inclusions de réduction de minerai de fer. Les séparations sont marquées par des lignes de soudure, témoignant de l'assemblage de plusieurs pièces à la forge pour fabriquer cette barre. Ceci nous permet notamment de montrer la présence de recyclage et réemploi des matériaux sur les chantiers de construction et de restauration de la cathédrale.
- ❖ La datation au radiocarbone sur la barre présentée dans ce poster nous permet de faire une première confirmation sur la chronologie du chantier concernant les fenêtres hautes du chœur, construites vers 1170, puis refaites vers 1225.