

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

Maître de conférences en Histoire médiévale à l'université Paris 8 et chercheur au sein du laboratoire ArScAn¹ du CNRS².

Il va être question ici des recherches sur l'usage du fer et plus généralement des métaux et notamment sur la circulation des métaux au Moyen Âge en prenant pour sujet d'étude la cathédrale Notre-Dame de Paris.

1 Introduction

Le travail présenté dans ce chapitre est un travail collectif qui se déroule dans le cadre du chantier scientifique de Notre-Dame, en particulier dans celui des travaux du groupe « Métal »³ qui s'intéresse plus particulièrement au fer. Les utilisations du fer à Notre-Dame de Paris seront tout d'abord évoquées en détaillant ce que l'incendie a apporté à cette connaissance. Nous nous interrogerons

ensuite sur les questionnements historiques et archéologiques quant à la nature, la qualité, la provenance de ces matériaux – que la chimie permet d'aborder.

2 L'élément fer dans la construction de Notre-Dame

Où retrouve-t-on du fer à Notre-Dame et que savait-on avant l'incendie ?

Sur ce dernier point, la réponse est « pas grand-chose ! ». Seuls quelques éléments étaient donnés dans le dictionnaire de Viollet-le-Duc sur un emploi d'agrafes (**figure 1**) au sein des maçonneries du chœur

1. Archéologies et Sciences de l'Antiquité.

2. Centre National de la Recherche Scientifique.

3. <https://www.notre-dame.science/gt-metal/>

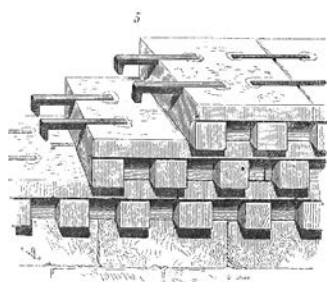


Figure 1

Agrafes schématisées par Viollet-le-Duc dans le Dictionnaire raisonné.



Figure 3

Armature de crête de faitage après l'incendie.

(probablement dès l'époque médiévale), de tirants⁴ et de chaînages⁵ (figure 2) ou d'armatures des crêtes de faitages en plomb (figure 3) que lui-même a contribué à ajouter lors de sa restauration au milieu du XIX^e siècle.

4. Tirant : « Sous une arcade ou une voûte, les tirants servent à empêcher l'écartement des murs ou des piédroits » [1].

5. Chaînage : « Armature en métal ou en béton armé ceinturant un bâtiment pour prévenir tout écartement des murs » [2].

L'incendie a mis en évidence beaucoup d'autres éléments et a permis de constater que le fer était utilisé comme moyen structural dans la maçonnerie par exemple, pour le liant⁶ d'éléments de décors, dans la charpente également, pour des consolidations diverses sous de nombreuses formes : des agrafes (figure 4), des clous, etc. Il a aussi contribué à révéler

6. Liant : « Matériau ayant la propriété de maintenir ensemble des agrégats » [3].



Figure 2

Vues des tirants et chaînages posés par Lassus dans le haut chœur en 1846.

les crêtes de faîtages en faisant fondre le plomb (*figure 3*).

Nous retrouvons des agrafes de fer dans la structure de Notre-Dame dès les premiers étages (*figure 5*), au-dessus des grandes arcades d'une dizaine de mètres de hauteur, élevées au milieu du XII^e siècle. Ces agrafes sont présentées *figure 6* avec leur répartition dans la structure, à la fois dans

la nef et dans le chœur. Nous comptons plusieurs centaines de pièces, chacune pesant 2 à 3 kg environ. Nous trouvons également des agrafes masquées, complètement invisibles avant l'incendie, mais qui ont pu être mises en évidence grâce à des changements de pierres et grâce à un détecteur de métal (*figure 7*). Des agrafes sont aussi employées pour



Figure 4

Agrafes de fer trouvées sous la charpente de Notre-Dame de Paris, au sommet des murs.

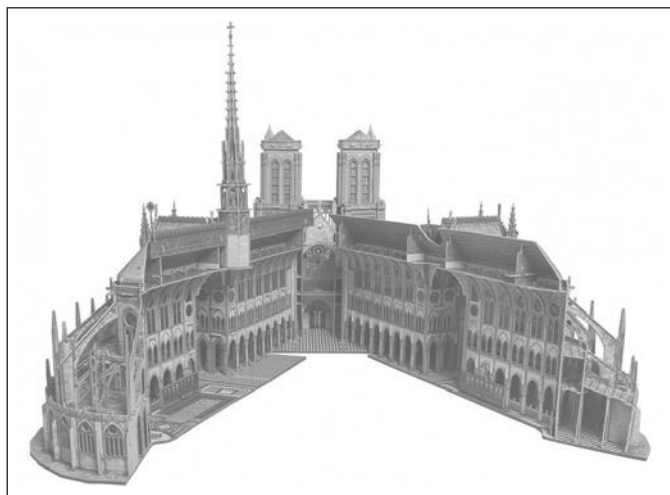


Figure 5

Représentation tridimensionnelle de Notre-Dame de Paris.



Figure 6

Agrafes au sol des tribunes.

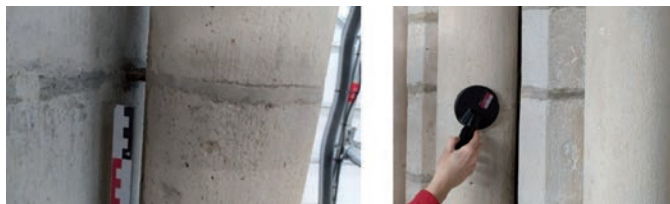


Figure 7

Mise en évidence d'une agrafe servant à maintenir un fût monolithique. Détecteur de métal positionné sur une colonne permettant de mettre en évidence une agrafe.



Figure 8

Vue générale des fûts de colonnes monolithiques.

consolider les fûts de colonnettes monolithiques⁷ très fragiles (figure 8) au niveau de la nef et des chapelles de l'édifice. Nous pouvons aussi mentionner les clous utilisés dans la charpente ainsi que d'autres armatures...

Il faut souligner l'important travail d'inventaire mis en place par le SRA⁸ et le Laboratoire des Recherches sur les Monuments Historiques. La répartition des éléments présents sur les voûtes après l'incendie a été établie par une véritable fouille archéologique suivant un carroyage préalablement établi à l'enlèvement de ces vestiges. Ainsi, avons-nous pu comprendre la répartition des différents

7. « Élément structural fait d'un seul bloc de pierre de grandes dimensions » [4].

8. Service Régional de l'Archéologie.

types de clous (figure 9). Certains d'entre eux ont vraisemblablement contribué aux scellements des éléments de la passerelle de la charpente (cf. chapitre 10). Enfin, diverses armatures qui tiennent une grande partie du décor en plomb sont à mentionner. C'est le cas des crêtes⁹ de faîtage¹⁰ par exemple, installées par Viollet-le-Duc au milieu du XIX^e siècle (figure 10), ou d'autres éléments de la flèche qui tiennent également avec des armatures de fer. Des armatures de fer ont donc été largement employées dans la structure de l'édifice.

9. « Ornement, motif décoratif placé au-dessus des faitières » [5].

10. « Pièce supérieure de la charpente d'un toit, composée généralement d'une ou plusieurs poutres de bois ou de métal auxquelles s'appuient les chevrons, et formant l'arrête centrale » [6].

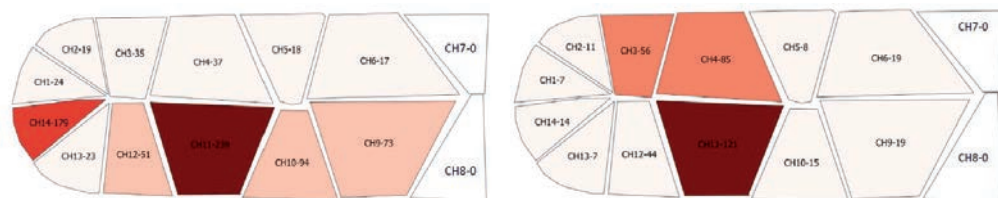


Figure 9

Distribution des clous prélevés sur les voûtes du chœur de Notre-Dame après l'incendie, par type (petits clous à gauche / gros clous à droite).

Figure 10

Armatures en fer (à gauche) des crêtes de faîtage en plomb (à droite), avant l'incendie.



3 Analyses et caractérisations chimiques

La **figure 11** donne un échantillonnage de la variété des objets sur lesquels nos études se sont portées et dont beaucoup ont été révélés par l'incendie de 2019, car ils étaient auparavant masqués ou inaccessibles.

3.1. Objectifs

Quelles sont les problématiques que l'on peut établir à partir de ce métal mis en œuvre dans la construction de Notre-Dame ?

Grâce à ces quelques diapositives, nous comprenons déjà les usages qui ont été faits du métal de l'époque médiévale jusqu'au XIX^e siècle. Nous pouvons aussi aborder la question de la nature, de la qualité et de son évolution au cours du temps, comprendre les aspects économiques relatifs à la gestion du chantier de construction, la provenance, l'approvisionnement des matériaux et également leur datation et leur chronologie. Nous nous intéressons également aux questions, très importantes, liées au recyclage ; nous avons parlé du réemploi des bois de la charpente



Figure 11

Variété des objets d'études pour Notre-Dame. Clous provenant de la charpente. Clous provenant du chœur. Agrafe de fer prélevée pour études. Agrafes référencées pour études. Élément d'un faîtage. Élément d'un tirant pour structure de pierre. © Cyril Frésillon/CNRS Images.

(cf. **chapitre 10**), qu'en est-il pour le métal ?

Le chantier scientifique de Notre-Dame se déroule après qu'un certain nombre de méthodologies ont été mises en place, notamment au sein du laboratoire « Archéomatériaux et prévision de l'Altération »¹¹ (depuis quasiment vingt ans). Nous avons donc pu aborder l'ensemble de ces questionnements avec des protocoles d'étude métallographique élaborés et qualifiés et avec des protocoles d'étude également qualifiés d'analyses chimiques des impuretés présentes au sein de ces matrices¹² métalliques. Nous parlerons des questions de datation radiocarbone¹³ à la fin du chapitre.

À la suite de l'incendie, plusieurs dizaines de pièces – des agrafes, des clous, des crêtes de faîtage, un tirant etc. – ont pu être soumises à ces analyses ; nous en présentons ici brièvement les résultats.

3.2. Filières opératoires de production du fer

En préambule, évoquons les filières de production du fer historiques au cours du

Moyen Âge et de la période moderne.

Deux filières techniques de production vont se succéder mais aussi se superposer en partie vers la fin du Moyen Âge et au début de l'Époque moderne. La filière directe, la plus ancienne, existe depuis l'âge du Fer : dans un bas fourneau, le minerai¹⁴ de fer est transformé à une température inférieure à la fusion du fer. Le minerai (en général un oxyde¹⁵ ou un hydroxyde) est réduit¹⁶ pour obtenir du fer métallique. Les impuretés sont évacuées hors du haut fourneau dans les scories¹⁷ (**figure 12**).

À partir de la fin du Moyen Âge, dès le milieu du ^{xiv}^e siècle (mais principalement aux ^{xv}^e-^{xvi}^e siècles pour le nord du royaume de France), une deuxième filière se développe : d'autres types de structures vont apparaître, notamment grâce à l'utilisation de l'énergie hydraulique qui va permettre d'activer de gros soufflets, de faire monter la hauteur des cheminées et donc la température, de dépasser la fusion du fer et de produire non

11. LAPA NIMBE/IRAMAT CEA/CNRS

12. « Ensemble de tous les constituants d'un échantillon contenant l'analyte [entité chimique qui est recherchée qualitativement ou quantitativement au sein de l'échantillon] » [7].

13. « Technique permettant d'estimer l'époque de fabrication d'une œuvre en mesurant le rapport entre les isotopes 14 (radioactif) et 12 (stable) du carbone contenu dans les résidus organiques » [8].

14. « Tout minéral naturel, ou toute association minérale, susceptible d'être utilisé comme source de fer » [9].

15. « Composé résultant de la combinaison de l'oxygène avec un corps » [10].

16. Réaction chimique qui fait intervenir un couple oxydant/réducteur (Ox/Red) et qui consiste en un échange d'électrons. L'équation chimique associée à la réduction s'écrit : $Ox + n e^- \rightarrow Red$.

17. « Résidu solide des opérations de traitement des minerais métalliques ou de l'affinage de certains métaux surnageant dans le métal en fusion » [11].

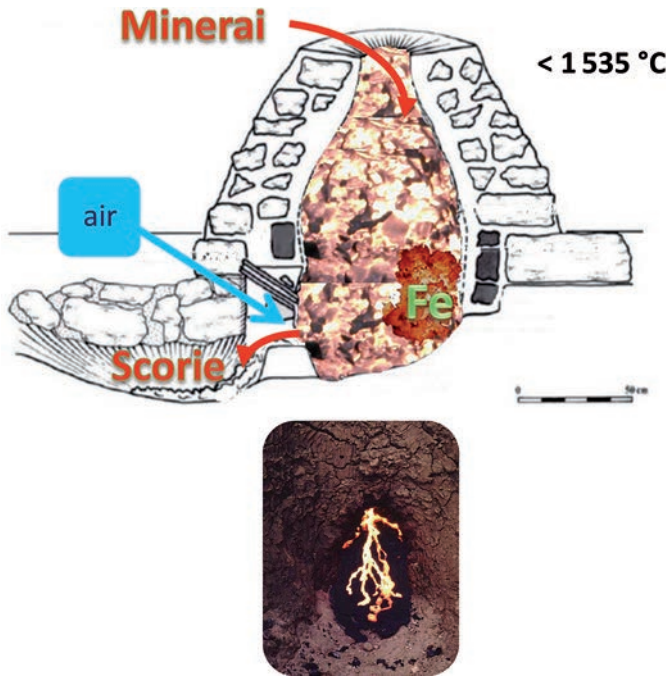


Figure 12

Schéma de fonctionnement d'un bas fourneau. Scorie s'écoulant en dehors du bas fourneau.

plus du fer mais de la fonte¹⁸. En dépassant cette fusion, le carbone diffuse¹⁹ bien davantage dans le fer liquide que dans le fer solide. La fonte, un alliage²⁰ de fer et de carbone à plus de 2 % doit dans un deuxième temps être décarburée²¹, affinée, et être transformée en fer forgeable ; en effet, la fonte peut être coulée mais trop dure et cassante,

elle ne peut pas être forgée. C'est la filière « indirecte » (figure 13) car le fer est produit en deux étapes : celle de la fonte en fourneau puis celle de l'affinage (figure 14). Dans la France du nord, ce procédé

18. « Alliage de fer, de carbone et autres éléments, obtenu par fusion du minerai de fer en haut fourneau » [12].

19. « Sauts effectués par des atomes dans les défauts (lacunes, joints de grain, interstitiels) du cristal, sous l'effet de l'agitation thermique » [13].

20. « Action [] de combiner ou de mélanger deux ou plusieurs métaux » [14].

21. « Opération métallurgique qui consiste à éliminer une partie du carbone contenu dans l'acier liquide » [15].

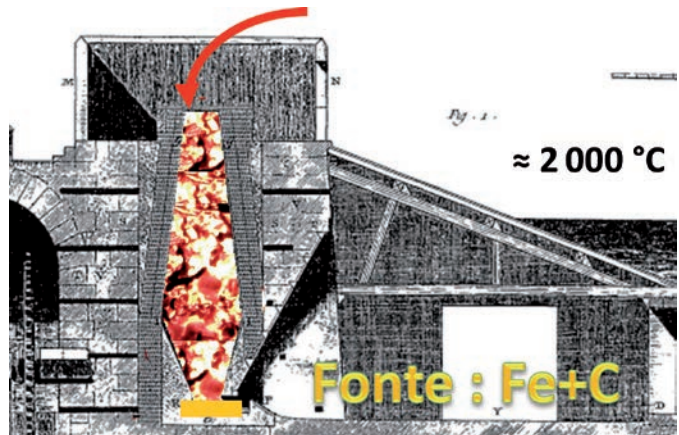


Figure 13

Schéma de fonctionnement d'un haut fourneau.



Figure 14

Affinage de la fonte par décarburation (vue d'un tableau d'Henri Blès, vers 1525-1550).

se répand durant la deuxième moitié du xv^e siècle ; à noter qu'il était parfois présent dans d'autres régions.

3.3. Analyses métallographiques d'une agrafe et d'un clou

La première étape de l'étude des matériaux prélevés sur

Notre-Dame est la détermination de leur structure par des analyses métallographiques²². La **figure 15** montre une des agrafes de la tribune du chœur ; **figure 16**, nous en voyons la micrographie. Elle est polie pour permettre une vision en microscopie optique²³.

Son attaque par des réactifs révèle une structure métallographique hétérogène. L'image parle d'elle-même : nous distinguons des zones ferritiques, c'est-à-dire où il n'y a pas de tout de carbone mais du fer pur et l'on devine les grains de fer assez réguliers parce



Figure 15

Agrafe brisée de la tribune du chœur prélevée pour analyses métallographique (vue avant prélèvement).

22. « Étude des métaux » [16].

23. « Elle se compose de quelques éléments principaux que sont un (des) objectif(s), un oculaire ainsi que d'un dispositif d'éclairage permettant d'atteindre des grossissements compris entre 30 et 1 500. La lumière utile à l'observation des échantillons s'étant des UV aux IR sur la gamme de longueurs d'onde [220 ; 1 700] nm » [17] ; [18].

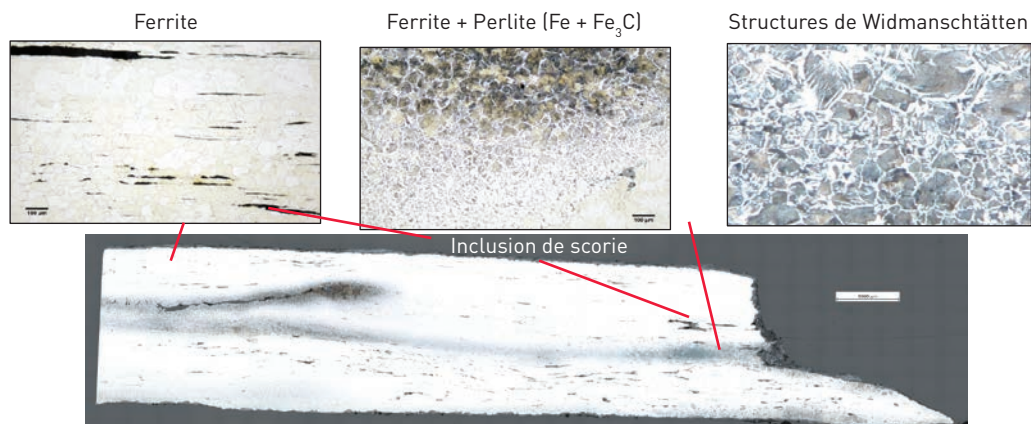


Figure 16

Micrographie d'une agrafe des tribunes du chœur de Notre-Dame après attaque au nital.

qu'ils ont recristallisé après la dernière forge. Les nombreux points noirs sont des inclusions²⁴ non métalliques ; ce sont les déchets – les scories – restés coincés dans cette matrice métallique jusqu'à aujourd'hui. Nous avons également en foncé une variété de zones hétérogènes : des mélanges de ferrite²⁵ et de perlite²⁶, voire juste de la perlite (un acier avec 0,8 % de carbone), un acier eutectoïde²⁷ qui prend la forme de bandes liées à l'allongement du matériau.

24. « Intégration au sein d'un composé hôte d'un composé de nature différente » [19].

25. « Oxyde polymétallique à base d'ions fer » [20].

26. Association de ferrite et de carbure de fer Fe_3C (cémentite).

27. En métallurgie, les diagrammes de phase font apparaître des transformations appelées eutectoïdes impliquant la transformation d'une phase solide (de métaux) en deux nouvelles phases solides distinctes. L'équation bilan associée est : $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$ [où α , β et γ désignent des phases solides distinctes de métaux].

Les agrafes ont des formes semblables à des barres de fer, simplement allongées et repliées. Certaines microstructures²⁸ traduisent des refroidissements rapides, probablement à l'air, à l'extérieur du fourneau. D'autres structures ne sont pas à l'équilibre, ce qui est très classique dans les fers anciens comme les fers de cathédrales. Notre-Dame est typique de bien d'autres monuments étudiés auparavant. Quelques pièces comme le clou de charpente de la **figure 17** montrent des structures beaucoup plus carburées ; la mise en forme de certains de ces clous était faite en roulant une feuille de fer sur elle-même.

Sur la **figure 18**, qui montre les surfaces et teneurs moyennes en carbone, nous notons la présence d'alliages ferreux qui sont véritablement des aciers avec plus de la moitié

28. « Structure d'un alliage étudiée par le procédé de la micrographie » [21].



Figure 17

Analyse métallographique d'un clou de la charpente de Notre-Dame.

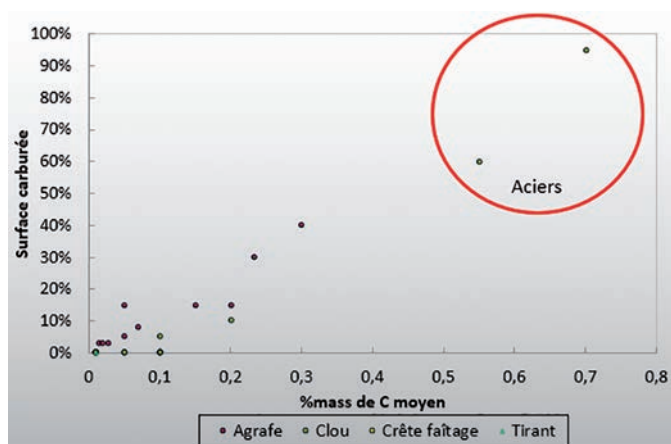


Figure 18

Surface carburée [en %] en fonction du pourcentage massique moyen de carbone présent dans divers matériaux : agrafe, clou, crête de faitage et tirant.

de leur surface carburée et des taux de carbone avoisinant 0,6-0,7 %. Cependant, la plupart des structures sont hétérogènes ou à dominante très fortement ferritique.

De tels tableaux sont assez classiques sur l'ensemble des cathédrales étudiées jusqu'alors. D'autres impu-

retés comme du phosphore peuvent aussi modifier le comportement mécanique de ces matériaux. La **figure 19** montre que beaucoup d'agrafes sont faites en soudant ensemble plusieurs pièces de fer ; les lignes de soudure apparaissent très bien dans le matériau et montrent que trois voire,

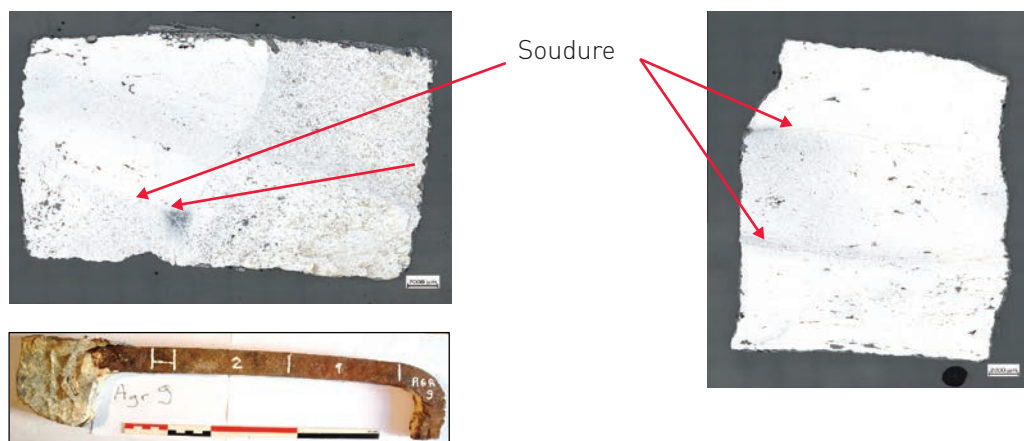


Figure 19

Analyse métallographique d'une agrafe. On distingue la présence de soudures utilisées par le procédé de fabrication.

quatre pièces, ont parfois été soudées les unes aux autres. Ceci pose question ; ces situations demeurent très rares pour les monuments précédemment étudiés. Première hypothèse : nous avons affaire à du recyclage car le fer ne se fondait pas à l'époque médiévale. En effet, la seule façon de le recycler à l'époque, c'est de le reforge, de le remélanger à la forge mais toujours sur un état solide puis de souder différentes pièces ensemble pour en former une plus grande. Deuxième hypothèse : ces petits modules de fer qui ont été soudés pour faire des agrafes sont liés aux contraintes de la production ou du marché.

C'est là où l'analyse chimique des impuretés, de taille micro-métrique à millimétrique (*figure 20*), est précieuse. Elles proviennent d'éléments qui contiennent une partie de l'information chimique comme

la composition du minerai de fer, utilisé pour réaliser le matériau ; cette composition va se conserver au cours des transformations jusqu'à l'intérieur des matrices sous la forme d'inclusions incomplètement expurgées. Les impuretés constituent ainsi des capsules microscopiques d'informations ; l'analyse de leur composition peut permettre d'aborder de nombreuses questions comme celles développées dans le **chapitre 12**, consacré aux matériaux du patrimoine.

3.4. Composition chimique des inclusions

La micrographie des fers observés permet de distinguer plusieurs zones (*figure 19*) où l'on peut reconnaître les deux lignes de soudure superposées dans cette coupe transversale. Par une analyse de chaque inclusion au moyen

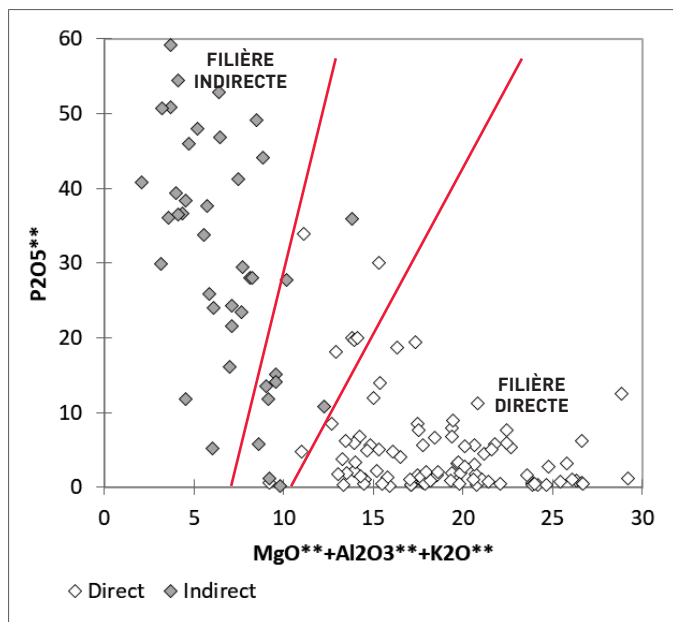


Figure 20

Répartition des inclusions en fonction de leur composition chimique permettant de déterminer la nature des filières opératoires de production (indirecte ou directe). D'après Ph. Dillmann, M. L'Héritier, "Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings : supply of materials and diffusion of smelting processes", *Journal of Archaeological Science*, 34, 2007, p. 1810-823.

d'un microscope électronique à balayage (MEB)²⁹ et en spectrométrie dispersive en énergie³⁰, nous pouvons déterminer les différences de composition. Par

29. « Technique d'observation de la topographie des surfaces. Son principe de fonctionnement est basé sur la détection d'électrons secondaires émergents de la surface sous l'impact d'un très fin pinceau d'électrons primaires qui balaye la surface observée » [22].

30. « Le spectromètre, défini comme un instrument spectral qui disperse dans l'espace la lumière émise par une source de radiation, qui isole une ou des bandes (ou fenêtres) spectrales spécifiques contenant les raies des analytes et qui mesure l'intensité des raies au moyen d'un ou plusieurs détecteurs » [23].

exemple, au niveau des lignes de soudures, il existe des inclusions qui correspondent aux ajouts qui ont été faits pour aider à ne pas oxyder³¹ ce fer au moment où l'on chauffe pour le souder. En outre, les inclusions de la partie centrale du fer sont faites d'un matériau de composition différente. La composition des inclusions dans la partie centrale est différente de celle de la partie haute et de la partie basse. Nous pouvons en déduire que nous sommes face à une soudure « en gueule-de-loup » : nous avons ouvert un morceau de fer pour en glisser un autre à l'intérieur et refermer le tout à la forge en chauffant.

L'étude met donc en évidence un procédé spécifique de mise en forme et que l'on retrouve sur la quasi-totalité des échantillons. Les inclusions nous livrent aussi des informations sur la nature des filières techniques employées pour réaliser le matériau (figure 20). Que l'on passe par la fonte ou que l'on produise du fer directement, la nature des impuretés trouvées à l'intérieur du matériau sera différente. Elle provient quasiment directement du minerai et de la scorie dans le cadre de la filière directe en bas fourneaux alors qu'elle résulte plutôt des opérations de décarburation de la fonte dans le cadre de la filière indirecte. Un abaque³²

31. Réaction chimique qui fait intervenir un couple oxydant/réducteur (Ox/Red) et qui consiste en un échange d'électrons. L'équation chimique associée à la réduction s'écrit : $\text{Red} \rightarrow \text{Ox} + n\text{e}^-$.

32. « Système de courbes planes tracées dans un repère orthogonal, utilisé pour effectuer graphiquement des calculs algébriques » [24].

de référence a été produit au cours des vingt années d'études qui ont précédé les travaux sur Notre-Dame ; nous pouvons désormais l'utiliser pour placer la composition des inclusions de scorie. L'étude requiert la caractérisation d'une centaine à plusieurs milliers d'inclusions pour un objet, ou même pour une partie d'un objet comme on l'a vu précédemment.

Grâce à ces travaux, nous constatons que les agrafes sont toutes en fer de bas fourneau, donc réalisées par le procédé utilisé au Moyen Âge (XII^e, XIII^e et XIV^e siècles) tandis que les pièces du XIX^e siècle sont naturellement fabriquées avec des procédés plus modernes – essentiellement en passant par l'affinage de la fonte. Le corpus de clous se trouve majoritairement dans des fers de hauts fourneaux et d'affinerie ; vraisemblablement, nous avons ici affaire à des objets produits à partir de procédés qui n'existaient pas (ou pas majoritairement en tout cas) avant la fin du XV^e ou le XVI^e siècle.

Ces résultats sont à replacer dans un cadre de consolidation, de réparation des charpentes et à associer à l'étude menée par le groupe « Bois ». Quelques clous sont cependant issus de la filière directe – peut-être le signe que nous nous trouvons dans des schémas de réemploi, de recyclage.

3.5. Caractérisations chimiques des éléments rares afin de retracer les régions d'approvisionnement en fer de Notre-Dame

L'étude des inclusions et leur caractérisation chimique ne se limite aux éléments majeurs ;

elle s'intéresse aussi aux éléments traces, comme les terres rares³³. Elle fournit alors des renseignements d'une tout autre nature. Elle vise par exemple à retracer les différentes sources de minerais, les régions de production qui ont approvisionné le Chantier de Notre-Dame. Ces études sont en cours.

Comme pour les bois, nous disposons d'un référentiel chimique en cours de construction, alimenté en continu au fil des études des sites archéologiques. Ces derniers livrent des scories que l'on peut analyser et comparer au cas de Notre-Dame. Bien entendu, de nombreux travaux sont encore à entreprendre, notamment en région francilienne, afin d'essayer de comprendre d'où vient ce fer. L'une des déductions de ces premières analyses est que tous les fers ne viennent pas du même endroit. Si tel était le cas, nous aurions, **figure 21**, une droite. Or nous avons plusieurs droites et donc un grand nombre de sources différentes pour une petite dizaine d'agrafes. À peu de chose près, quasiment chaque agrafe semble ainsi avoir une origine différente ; nous voyons même que certaines agrafes ont plusieurs origines, ce qui confirme *a priori* la pratique du

33. « Les terres rares sont constituées du groupe des lanthanides (éléments 57 à 71 du tableau de Mendeleïev), auxquels sont habituellement ajoutés l'yttrium et le scandium. Elles forment une famille très homogène de 17 éléments aux propriétés chimiques extrêmement voisines (propriétés magnétiques, propriétés optiques, température de fusion et d'ébullition élevées) » [25].

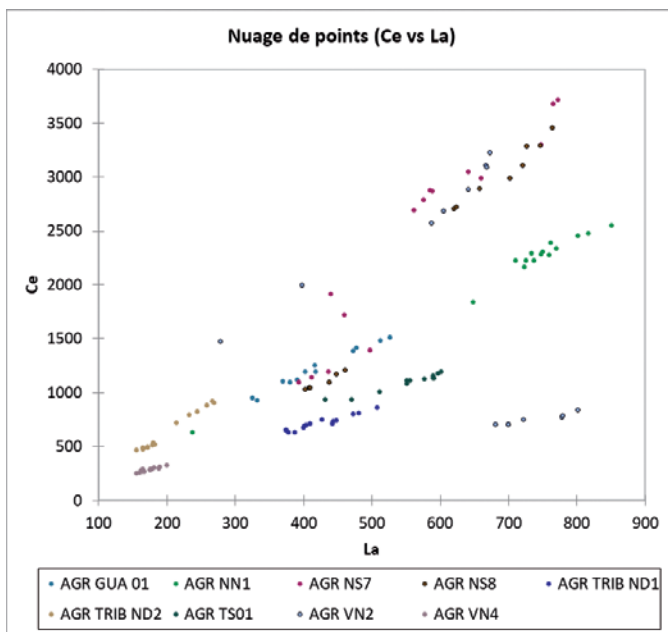


Figure 21

Répartition des inclusions en fonction de leur teneur (en ppm) en lanthane (La) et cérium (Ce) qui met en évidence différentes sources de minerai.
1 pt = 1 inclusion

recyclage évoquée plus haut ou du moins, l'existence de la pratique de l'assemblage de plusieurs matériaux d'origines vraiment distinctes.

3.6. Question du recyclage du fer

Recyclage ou pas ? Beaucoup de questions restent en suspens à ce sujet.

Est-ce que Notre-Dame a été construite avec 80 % de fer recyclé ou a-t-on plutôt approvisionné des barres forgées dans des centres, les fournisseurs des forgerons s'approvisionnant dans différentes régions. Paris est une place marchande majeure, peut-être la plus importante du royaume de France et nous pouvons

penser que du fer arrive de toutes parts et que le forgeron, par contrainte logistique plutôt que technique, assemble différentes pièces de fer pour forger son agrafe de 3 kg. Ce sont quelques exemples de questions que l'on espère pouvoir élucider en poursuivant le chantier de restauration.

3.7. Datation radiocarbone

Dernier point abordé, celui de la datation radiocarbone (cf. **chapitre 10**).

Il est en effet très stimulant d'apprendre à retrouver la date où le fer a été fabriqué et donc peut-être mis en œuvre dans l'édifice. Bien sûr, s'il s'agit de fer recyclé, c'est un peu compliqué. Toutefois, nous

souhaitons pouvoir mettre en regard une datation du matériau avec la datation supposée du bâti dans lequel il se trouve. Les matrices métalliques d'alliages ferreux et l'acier en particulier, contiennent du carbone et se prêtent bien aux techniques de datation radiocarbone. Après attaques par des réactifs, nous pouvons voir sur les micrographies d'échantillons, les zones aciérées et les zones ferritiques, contenant donc du carbone. Nous recueillons ce carbone localisé dans les carbures de fer³⁴, dans la perlite, pour le dater par une datation radiocarbone classique.

Plus précisément, nous faisons une attaque métallographique (figure 22), et nous prélevons le carbone au foret sur les bandes carburées. Le carbone est extrait sous forme gazeuse puis graphitisé et daté par datation radiocarbone par AMS³⁵

34. « Composé formé par la combinaison du carbone avec du fer » [26]. Un exemple de carbure de fer est la cémentite de formule chimique Fe_3C .

35. Spectrométrie de masse par accélérateur (AMS) : technique de physique nucléaire [...] qui, appliquée au ^{14}C « permet de transformer les atomes de carbone de l'échantillon à dater en un faisceau d'ions mesurables en éliminant une grande partie des atomes ou molécules possédant la masse atomique 14. Appliquée à la datation pour le ^{14}C , cette technique permet de compter directement les atomes de ^{14}C sans attendre leurs désintégrations comme dans les méthodes classiques par comptage » [27]. La SMA couple ainsi la spectrométrie de masse à un accélérateur. La spectrométrie de masse est une technique permettant d'identifier et de détecter des fragments moléculaires par enregistrement de leur rapport masse/charge (rapport nommé m/z).

au laboratoire de mesure du radiocarbone (figure 23). Nous avons pu dater quelques pièces, quelques agrafes qui viennent des tribunes, d'autres qui viennent du haut des murs, quelques clous. Nous avons des précisions qui sont celles de datations radiocarbone avec un pallier relativement important sur le XII^e siècle.

En recalant les dates obtenues avec le début du chantier des tribunes (vers 1160) et le chantier des parties hautes (vers 1210), nous sommes en cohérence avec la construction de la charpente de la nef (1215, cf. chapitre 10). Les fers mesurés ont été produits au milieu du XII^e et au début du XIII^e siècle ; nous avons schématisé les

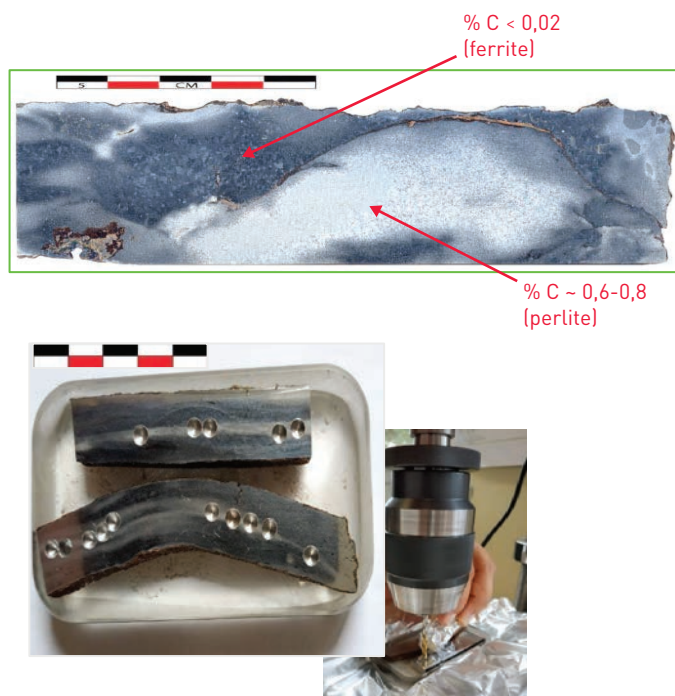


Figure 22

Prélèvement sur des échantillons attaqués par des réactifs pour datation radiocarbone sur les bandes carburées.

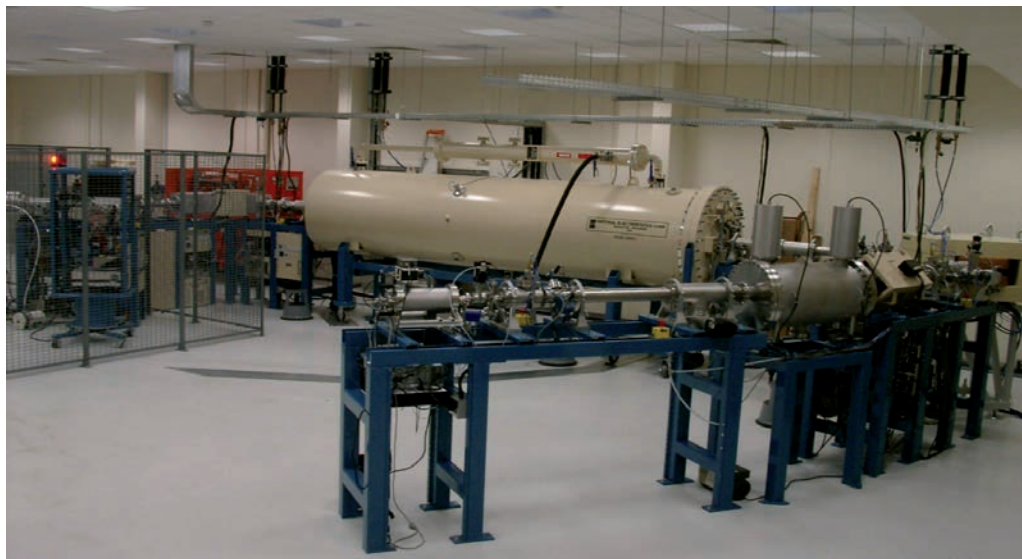


Figure 23

Spectromètre de masse par accélérateur ARTEMIS (Accélérateur pour la Recherche en Sciences de la Terre, Environnement, Muséologie Installé à Saclay).

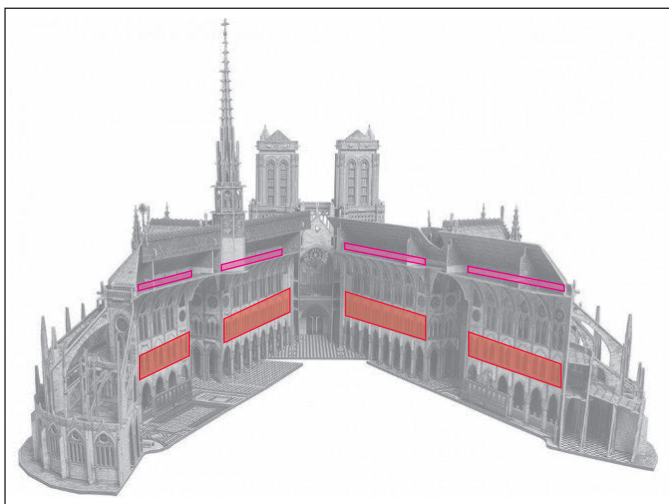


Figure 24

Localisation des deux étages sur lesquels se trouvent les agrafes analysées.

deux étages où ils se sont trouvés dans la structure de l'édifice (figure 24).

La datation peut en principe répondre à de nombreuses questions. Voici quelques pistes pour les années à venir :

– elle peut permettre d'arriver à une forme de modélisation des chantiers de construction. Il reste encore des écarts de l'ordre d'une cinquantaine d'années entre le chantier de la nef et la production des agrafes ; des

études complémentaires pourraient réduire les écarts ;

– les études disponibles sur les clous sont encore embryonnaires. En effet, nous n'avons daté que deux clous qui ne correspondent en fait à aucune période remarquable dans l'étude des charpentes. Leur installation correspond-elle à des phases de consolidation

jusqu'ici inconnues ou a-t-on affaire à des clous recyclés dont l'âge ne correspond pas à celui du bâti dans lequel ils sont mis en œuvre ?

Bien entendu, cette liste de pistes de recherches sur Notre-Dame, permise par les datations et à conduire dans un proche avenir, n'est pas limitative !

Conclusions et perspectives : quelques certitudes

La datation nous permet d'assurer de manière définitive l'intégration très précoce du métal dans l'architecture : Notre-Dame possédait des renforts en fer dès 1160. C'est quarante à cinquante ans avant la cathédrale de Chartres ou la cathédrale de Bourges – les premières églises gothiques que l'on savait jusqu'alors bardées de fer. Il y a ici un lien probable avec l'ampleur du chantier de Notre-Dame, sa hauteur sous voûte, la hauteur de ses premières arcades et nous pourrions dire que les architectes ont répondu à ces défis techniques en intégrant le métal dans la construction.

Avec encore beaucoup de questions ouvertes

- sur la qualité et les défauts des pièces utilisées à Notre-Dame de Paris qui ne diffèrent pas des autres cathédrales, ce qui interroge sur la question des réparations et des consolidations de l'édifice ;
- sur l'approvisionnement en matériaux ;
- sur le recyclage des matériaux ;
- sur l'environnement parisien au Moyen Âge qui semble suffisamment riche pour drainer du métal venu de partout.

Bibliographie

- [1] Ferauge, M., & Mignerey, P. (1996). « L'utilisation du fer dans l'architecture gothique : l'exemple de la cathédrale de Bourges ». *Bulletin Monumental*, 154 (2), 129-148. <https://doi.org/10.3406/bulmo.1996.4550>
- [2] Définition : *Chaînage* - *Dictionnaire de français Larousse*. (s. d.). <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/cha%C3%A9nage/14437>
- [3] Définition : *Liant*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/liant>
- [4] Définition : *Monolithe*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/monolithe>
- [5] Définition : *Crête*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/crete>
- [6] Définition : *Faitage*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/faitage>
- [7] Skoog, D. A., West, D. M., Holler, J. F., & Crouch, S. R. (2013). *Fundamentals of Analytical Chemistry* (9^e éd.). Cengage Learning.
- [8] [2013]. « Les méthodes usuelles d'analyse des œuvres d'art ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [9] Astier, J. (2011). « Minerais et fondants ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [10] « Tout savoir sur l'oxyde ». *Techniques de l'ingénieur* (s. d.). <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/oxyde>
- [11] Définition : *Scorie*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/scorie>
- [12] Définition : *Fonte*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/fonte>
- [13] Guiraldenq, P. (1994). « Diffusion dans les métaux ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [14] Définition : *Alliage*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/fonte>
- [15] Masson, J.-M. (2007). « Élaboration de l'acier moulé - Analyse des processus métallurgiques ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [16] Définition : *Métallographie*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/metallographie>
- [17] Pokorny, J. A. (1994). « Métallographie ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [18] Roblin, G. (1999). « Microscopie optique ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [19] « Tout savoir sur l'inclusion ». *Techniques de l'ingénieur* (s. d.). <https://www-techniques-ingenieur-fr.portail.psl.eu/glossaire/inclusion>
- [20] Beuzelin, P. (1987). « Ferrites doux ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [21] Définition : *Microstructure*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/microstructure>
- [22] Ruste, J. (2013). « Microscopie électronique à balayage - Principe et équipement ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [23] Mermet, J.-M. (2002). « Systèmes dispersifs en spectrométrie atomique ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [24] Définition : *Abaque* - *Dictionnaire de français Larousse*. (s. d.). <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/abaque/32>
- [25] Lévêque, A., Maestro, P., (1993). « Terres rares ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [26] Définition : *Carbure*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/academie8/carbure>
- [27] *Radioactivité* : *Spectrométrie SMA*. (s. d.). https://www.laradioactivite.com/site/pages/Spectrometrie_SMA.htm