

L'emploi du fer dans la construction monumentale à la fin du Moyen Age : production et utilisation.

Maxime L'HERITIER¹, Philippe DILLMANN², Paul BENOIT³

- 1- Laboratoire Pierre Süe CEA/CNRS, UMR 9956, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France ; Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR 8589, LAMOP, Equipe d'Histoire des Techniques, 9 rue Malher, 75181 Paris cedex 04, France, e-mail : maxime.lheritier@cea.fr.
- 2- IRAMAT CNRS UMR 5060 et Laboratoire Pierre Süe CEA/CNRS UMR9956, CEA Saclay, 91191 Gif sur Yvette cedex, France.
- 3- Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR 8589, LAMOP, Equipe d'Histoire des Techniques, 9 rue Malher, 75181 Paris cedex 04.

Introduction

La problématique de l'emploi du fer dans les églises de la période gothique est redevenue une question d'actualité au milieu des années 1980, lorsque certains historiens, archéologues et architectes ont repris ce sujet qui avait fait l'objet d'amples controverses¹, non seulement au cours XIXe et XXe siècles, mais également plusieurs siècles auparavant, les premiers propos hostiles au fer de construction remontant au milieu du XVI^e siècle avec les écrits de Philibert Delorme². Avant ces travaux de la fin du XXe siècle, seul Viollet-le-Duc avait consacré une importante partie de son œuvre au sujet de l'utilisation du fer dans la construction médiévale, notamment aux articles « Armatures » et « Chaînage » de son

¹ CHAPELOT (O.), BENOIT (P.), éd., *Pierre et métal dans le bâtiment au Moyen Age*, Paris, EHESS, 1985, 370 p., réimpression, Paris, 2001 ; HAAS (W.), « Die Rolle des Eisens in der vorindustriellen Architektur dargestellt an ostbayerischen Beispielen », dans *Die Oberpfalz ein Europäisches Eisenzentrum 1600 Jahre Grosse Hammereinung*, Amberg, Ostbayern Bergbau-und Industrie Museum, 1987, p. 495-504 ; TAUPIN (J.-L.), « Le fer des cathédrales », *Monumental*, 1996, p. 18-27.

² « et sans les poutres souvent les dictes murs tomberaient, qui sont retenus par grandes barres de fer, & grandes clefs qu'ils mettent sur lesdictes poutres à travers des murailles au droit des chaînes de pierre de taille, afin que les murs ne reculent. En cela y a un grand abus que les ouvriers font. Car si on leur avoit baillé l'œuvre à la charge de n'y mettre du fer, ils seroient contraincts de faire mieus les murailles & de plus grande grosseur & force qu'ils ne font », Ph. Delorme, *Architecture, livre X, « Des nouvelles inventions pour bien bastir »*, chapitre IV. Pour l'édition actuelle, DELORME (Ph.), *Architecture de Philibert de l'Orme*, Rouen, D. Ferrand, 1648, rééd. Bruxelles, P. Madraga, 1981, livre X, chapitre IV, p. 282.

*Dictionnaire Raisonné*³. Viollet-le-Duc est en outre le premier à établir un lien entre l'avènement de la période gothique et l'essor des fers de construction à la même époque⁴.

Depuis une dizaine d'années, les avancées successives de la recherche ont permis la définition d'une problématique multiple qui n'est pas uniquement liée à l'architecture du bâtiment. Si, à ce sujet, les premières interrogations sont bien naturellement d'ordre architectural, à savoir à quels endroits et dans quels buts le fer a été utilisé, elles ne doivent se substituer, ni à l'aspect socio-économique du chantier de construction, ni aux questions techniques liées à la production du fer aux périodes historiques. En quelles quantités ces fers de construction ont-ils été employés dans ces grands édifices ? Quel coût pour leurs chantiers ? Quelles étaient la nature, la qualité et la résistance de ces alliages ferreux mis en œuvre dans le bâti ? Quels acteurs ont contribué à leur production et à leur commerce ? L'appréhension diachronique de ces divers questionnements ne peut se concevoir sans étude interdisciplinaire, car ce n'est que par la confrontation des informations des différentes sources que certaines réponses pourront être apportées. Aussi, la recherche sur chaque édifice se doit de faire appel aux trois principales types de sources archéologiques et historiques disponibles : prospections dans le bâti avec relevé précis des structures découvertes, étude des archives de restaurations contemporaines et des comptes de construction médiévaux, notamment des chapitres traitant des « dépenses pour forges » et enfin analyse métallographique d'échantillons de fer prélevés *in situ* ou provenant de déposes consécutives à des restaurations⁵. Cet article fait le point sur de nouveaux résultats issues de l'application de cette méthodologie à plusieurs églises gothiques du nord du royaume de France, principalement trois églises rouennaises, la cathédrale Notre-Dame, l'église Saint-Ouen et l'église Saint-Maclou et quatre églises troyennes, la cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul et les églises Saint-Urbain, Saint-Jean-au-Marché et Sainte-Madeleine.

³ VIOLLET-LE-DUC (E.), *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e*, 10 tomes, 1854-1868, rééd. Paris, 1997.

⁴ « Le fer fut appelé à jouer un rôle assez important dans l'art de bâtir avec la construction ogivale », *Ibid.*, tome 1, p. 461.

⁵ Les analyses réalisées comprennent l'observations macroscopiques et microscopiques de surfaces polies éventuellement attaquées avec différents réactifs (Nital, Oberhoffer) et l'analyse élémentaire des inclusions non métalliques contenues dans la matrice de ces fers au Microscope Electronique à Balayage couplé au système de détection par EDS. Pour plus de détails sur le mode opératoire, L'HERITIER (M.), JUHIN (A.), DILLMANN (Ph.), ARANDA (R.), BENOIT (P.), « Utilisation des alliages ferreux dans la construction monumentale du Moyen Age. État des lieux de l'avancée des études métallographiques et archéométriques », *La Revue d'Archéométrie*, 29, 2005, p. 117-127 ; DILLMANN (Ph.), L'HERITIER (M.), « Tracing supply and smelting processes by slag inclusions analyse of ferrous alloys employed for the construction of French medieval monuments », *Journal of Archaeological Science* (2007), sous presse.

Des dizaines de tonnes de fer mises en œuvre dès l'époque médiévale

Les usages du fer dans une église gothique sont multiples : de la simple agrafe au gros tirant de fer en passant par les barlotières de vitraux et les attaches des statues, les plus grandes cathédrales et églises de la période gothique comptent plusieurs dizaines d'utilisations distinctes d'alliages ferreux⁶. Ces armatures, installées au cours de la construction, font le plus souvent partie de la conception originelle du monument. Leur datation relative, qui peut être assurée par leur position dans le bâti, est aussi parfois confirmée par les mentions correspondantes dans les comptes de construction médiévaux. Elle peut également, s'il y a prélèvement, être déterminée par discrimination de la filière de réduction dont est issu le fer composant l'objet. La fin du Moyen Age est en effet en Europe occidentale le siège d'une mutation technique dans les procédés d'obtention du fer : le passage de la réduction directe en bas fourneaux à la filière indirecte en hauts fourneaux puis affineries. Dans le nord du royaume de France, les deux procédés coexistent pendant une période comprise entre l'extrême fin du XIV^e et le XVI^e siècle⁷. La plus ancienne mention attestée de la filière indirecte remonte en effet à 1377, dans le sud de la Champagne, sur le site d'Estissac (Aube) situé en bord de Vanne⁸. Son apparition dans l'ouest du pays est plus tardive et n'est pas antérieure à la seconde moitié du XV^e siècle⁹. Grâce aux avancées réalisées en archéométrie depuis une dizaine d'années, il est désormais possible de discriminer dans des cas favorables, fers de réduction directe et fers de réduction indirecte, en se basant sur l'analyse élémentaire des inclusions non métalliques contenues dans la matrice de l'objet¹⁰. Ce critère de datation relative peut permettre de confirmer l'authenticité d'un élément ou d'un système de

⁶ L'HERITIER (M.), *L'utilisation du fer dans l'architecture gothique. Les cas de Troyes et de Rouen*, Thèse d'archéologie de l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne sous la direction de P. BENOIT, 2007, vol. 5 ; TAUPIN (J.-L.), « Le fer des cathédrales »..., *op. cit.*

⁷ BENOIT (P.), *Les mutations techniques et scientifiques de la fin du Moyen Age et de la Renaissance*, Lille, Micro-éditions universitaires, 1994, p. 132-141.

⁸ ROUILLARD (J.), *L'homme et la rivière : histoire du bassin de la Vanne au Moyen Age (XII^e-XVI^e siècle)*, Thèse de doctorat d'histoire de l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne sous la direction de M. BOURIN, 2003, p. 401.

⁹ BELHOSTE (J.-F.), LECHERBONNIER (Y.), ARNOUX (M.), ARRIBET (D.), AWTY (B. G.), RIOULT (M.), *La métallurgie normande, XII^e-XVIII^e siècles. La révolution du haut fourneau*, Caen, l'Inventaire, 1991, p. 51 ; ARRIBET-DEROIN (D.), *Fondre le fer en gueuses au XVI^e siècle : le haut fourneau de Glinet en pays de Bray*, Thèse de doctorat d'archéologie de l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne sous la direction de P. BENOIT, 2001, 799 p.

¹⁰ DILLMANN (Ph.), *Diffraction X, Microdiffraction X et Microfluorescence X sous Rayonnement Synchrotron et analyses comparées pour la caractérisation des inclusions. Application à l'étude de l'évolution historique des procédés d'élaboration des objets ferreux (procédés direct et indirect)*. Thèse de doctorat de l'université de Technologie de Compiègne présenté sous la direction de G. BERANGER, 1998, 302 p. ; DILLMANN (Ph.), L'HERITIER (M.), « Tracing supply and smelting processes... », *op. cit.*

construction dans des maçonneries élevées à l'époque médiévale mais fortement restaurées ultérieurement (fig. 1)¹¹.

En termes de quantités, les estimations réalisées sur les structures actuelles et confirmées par les données des archives comptables des XIV^e et XV^e siècles indiquent que la masse de fer utilisée au cours de la période médiévale pour la construction de chacune des plus grandes églises du royaume de France se compte en dizaines de tonnes¹². Ces constatations rejoignent celles de W. Haas sur les églises du Haut-Palatinat¹³. De tels tonnages ne se limitent toutefois pas aux églises gothiques : les estimations réalisées par Ph. Bernardi pour le Palais des Papes en Avignon font état de plusieurs centaines de tonnes mises en œuvre dans la construction¹⁴, et dans le cas du donjon du château de Vincennes, les premières estimations réalisées par J. Chapelot en 1996 faisaient état de 12 tonnes de fer¹⁵.

D'après les comptes, environ la moitié du fer acheté par la fabrique est mise en œuvre dans les vitraux (fig. 2). Selon les estimations réalisées sur les structures en place et confirmées par les données disponibles dans les archives médiévales, cela représente plusieurs tonnes à dizaines de tonnes par édifice, atteignant près de 25 t de fer pour les églises ayant une importante surface vitrée comme l'abbatiale Saint-Ouen de Rouen ou la cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul de Troyes (fig. 3), dont une grande baie peut contenir plus d'une demi-tonne de fer¹⁶. La fonction de ces armatures est double : tenir le vitrail grâce aux vergettes et aux barlotières et conforter la maçonnerie essentiellement au moyen de tirants généralement pourvus de tenons et servant donc également de barlotières (fig. 4). Cette dichotomie entre les éléments qui servent à tenir la maçonnerie, à savoir d'une part les barlotières-tirants et les goujons et crampons internes au remplage et d'autre part les éléments qui servent à tenir le vitrail, c'est-à-dire les simples barlotières et les vergettes est déjà évoquée comme telle à la

¹¹ L'HERITIER (M.), JUHIN (A.), DILLMANN (Ph.), ARANDA (R.), BENOIT (P.), « Utilisation des alliages ferreux... », *op. cit.*

¹² L'HERITIER (M.), *L'utilisation du fer dans l'architecture gothique...*, *op. cit.*, p. 719-720.

¹³ HAAS (W.), « Die Rolle des Eisens... », *op. cit.*

¹⁴ BERNARDI (Ph.), DILLMANN (Ph.), « Stone skeleton or iron skeleton: The provision and use of metal in the construction of the Papal Palace at Avignon in the 14th century », dans BORK (R.), dir., *De Re Metallica. The uses of metal in the Middle Ages*, Ashgate, 2005, p. 297-315.

¹⁵ AMOUDRUZ (F.), CHAPELOT (J.), CLEMENT (S.), *Les éléments métalliques (fer et plomb) dans l'architecture du donjon du château de Vincennes. Étude préliminaire*, Vincennes, ERCVBE, 1997, p. 50. Elles n'ont cependant pas été actualisées dans sa dernière publication malgré les nombreuses découvertes lors de la restauration des parties hautes du donjon, CHAPELOT (J.) « Le donjon et son enceinte. Une résidence royale », *Les Dossiers d'Archéologie*, n° 289, déc. 2003/janv. 2004, p. 60-73.

¹⁶ *Item semblablement fault en chascune formette, tant pour les quatre gros barreaux, goujons et crampons servants à la maçonnerie comme pour les petiz barreaux locquettez, verges servans aux verrières, environ ung millier fer pris ez garnisons de l'église, pour ce, neant*, Arch. dép. Aube, G 1571, fol. 68 r°.

fin du XVe siècle par le procureur de la fabrique de la cathédrale de Troyes¹⁷. Cependant, outre le maintien des vitraux, le rôle exact des fers dans l'équilibre d'une fenêtre gothique soulève encore certaines doutes. Si J.-L. Taupin leur reconnaît un rôle majeur dans l'encaissement des poussées des vents¹⁸, une modélisation réalisée par R. Bartel et *al* sur une fenêtre de l'église Saint-Georges de Nördlingen semble minimiser leur influence à ce niveau¹⁹. De plus, ces tirants ne semblent la plupart du temps pas liés les uns aux autres dans les piédroits des baies pour former des chaînages²⁰ : parmi les églises rouennaises et troyennes, seule l'église Saint-Urbain de Troyes possédait, vraisemblablement dès la période médiévale, un chaînage dans ses baies hautes qui enserrait le chevet de l'édifice, d'après les archives des restaurations réalisées par P. Seltersheim au XIXe siècle²¹. Ce chaînage vient s'ajouter aux exemples déjà connus de la cathédrale de Beauvais et de la Sainte-Chapelle de Paris²².

L'emploi du fer ne se limite toutefois pas aux vitraux. L'étude de l'ensemble des sources disponibles a permis de montrer que bien d'autres parties de leur structure sont très fréquemment renforcées dès l'origine par des éléments de fer. Par exemple, les tours situées à la croisée des transepts, comme les tours-lanternes qui coiffent de nombreuses églises normandes, présentent bien souvent des chaînages périphériques. C'est notamment le cas des églises Saint-Ouen et Saint-Maclou. Chaînage double et apparent dans le premier cas²³, chaînage simple et enfoui dans la maçonnerie dans le second, ils contribuent à empêcher l'éclatement de la tour sous la pression des vents ou des parties supérieures (fig. 5 et 6).

¹⁷ *Ibid.*

¹⁸ TAUPIN (J.-L.), « Le fer des cathédrales »..., *op. cit.*

¹⁹ En revanche, l'auteur reconnaît à ces barres un rôle essentiel dans la rigidité horizontale qu'elles apportent à la fenêtre lors de sa construction, et une fois celle-ci achevée, dans la stabilité verticale des meneaux dans le plan de la fenêtre, BARTEL (R.), SCHIEMANN (L.), JAGFELD (M), « Static analysis and evaluation of a gothic « choir-window » consisting of a filigree tracery and slender stone ribs », dans *Proceedings of the First International Congress on Construction History*, Madrid, 2003, p. 333-340.

²⁰ Les archives ne mentionnent pas de chaînage pour les baies pour lesquelles les comptes de construction sont conservés : fenêtres hautes du chœur de la cathédrale de Rouen et baies hautes de la nef de la cathédrale de Troyes, Arch. dép. Aube, G 1571 et G 1573 ; Arch. dép. Seine-Maritime, G 2487, G 2489, G 2490 et G 2491. De plus, de nombreux défauts d'alignement entre les tirants de fenêtres mitoyennes interdisant toute jonction dans les piédroits des baies ont été observés. En outre, à l'exception des tirants hauts dont l'ancrage se fait au niveau d'un joint entre deux blocs de pierre de manière quasi-systématique, les autres tirants sont fréquemment ancrés en pleine pierre à leurs extrémités : ils ne sont donc pas chaînés. Enfin, tous les tests de continuité électrique réalisés sur les tirants accessibles se sont révélés négatifs.

²¹ Médiathèque du Patrimoine, doc. n° 0081/010/0106.

²² ERLANDE-BRANDENBURG (A.), « L'architecture rayonnante et le métal », *Dossiers d'archéologie*, n° 219, déc. 1996 - janv. 1997, p. 46-53 ; TAUPIN (J.-L.), « Le fer des cathédrales »..., *op. cit.*

²³ La continuité des trois cours de tirants intérieures n'a pas été prouvée faute de démontage.

L'absence de démontage des parties concernées pour la cathédrale de Rouen n'a pas permis de faire les mêmes observations.

De même, bien qu'assez rarement conservées, les charpentes originelles des édifices gothiques étaient aussi renforcées d'étriers, de bandes et de chevilles de fer au moins dès le milieu du XIV^e siècle, selon les indications des comptes des fabriques des cathédrales de Troyes et de Rouen²⁴. Le même constat avait été fait par D. Cailleaux pour la cathédrale de Sens au tournant des XV^e et XVI^e siècles²⁵. Bien qu'au XIII^e siècle, les exemples semblent toutefois encore assez exceptionnels²⁶, ces constatations remettent en partie en question la vision des charpentes gothiques dénuées d'éléments de fer donnée par Viollet-le-Duc²⁷.

Enfin, balustres, colonnettes et pinacles contiennent de grandes quantités de fer essentiellement sous forme d'agrafes et de goujons. Le détail de la construction d'un seul pinacle de la façade occidentale de la cathédrale de Rouen mentionne la mise en œuvre d'environ 15 kg de fer²⁸. En extrapolant ces données, ce sont plusieurs tonnes de ces petites pièces de fer qui sont employées dans chaque édifice. Leur emploi atteint son paroxysme dans les jubés dont la plupart du décor sculpté est ainsi renforcé. Les mentions relatives à la construction des jubés de la cathédrale de Troyes entre 1382 et 1399 et de l'église Saint-Madeleine au début du XVI^e siècle indiquent que plus d'une tonne de fer y a été mise en œuvre²⁹ (fig. 7).

L'approvisionnement des chantiers de construction : coût et origine du métal

Malgré ces quantités montant à plusieurs dizaines de tonnes, les dépenses pour forge ne représentent en moyenne que 2 à 4 % des dépenses totales du chantier et ne semblent en

²⁴ L'HERITIER (M.), *L'utilisation du fer dans l'architecture gothique...*, op. cit., p. 711-714.

²⁵ CAILLEAUX (D.), *La cathédrale en chantier. La construction du transept de Saint-Etienne de Sens d'après les comptes de la fabrique 1490-1517*, Paris, CTHS, 1999, p. 386.

²⁶ EPAUD (F.), *L'évolution des techniques et des structures de charpenterie du XI^e au XIII^e siècle en Normandie. Une approche des charpentes par l'archéologie du bâti*, Thèse de doctorat d'histoire de l'université de Rouen sous la direction de A.-M. FLAMBARD-HERICHER, Rouen, 2002, p. 148.

²⁷ « pour la charpente, le fer ne fut employé que fort tard et pendant toute la période ogivale on n'en fit point usage. Les charpentiers, du Moyen Age jusqu'à la fin du XVI^e siècle, ne cherchèrent d'autres combinaisons que celles données par un judicieux emploi du bois, sans le secours de ferments », VIOLLET-LE-DUC (E.), *Dictionnaire raisonné...*, op. cit., tome I, p. 461-462.

²⁸ *Item audit Jourdain pour autres parties ouvrées en graffes, goujons et vertevelles, baillés par parties à maistre Johan Perier en euvre par les massons au pignacle du coste de l'o, lesquelles parties le dit Perier m'a baillé en gros le pesant à XXXII l. de fer, pour ce, XXXII s. Pour ces II parties compté au dit Jourdain, LX s. t.*, Arch. dép. Seine-Maritime, G 2483, fol. 143 v^o.

²⁹ Bibl. nat., ms. lat. 9112, fol. 129 v^o, ms. lat. 9111, fol. 12 r^o, 67 r^o, 152 v^o, 232 r^o, 259 v^o, 277 r^o ; Arch. dép. Aube, 16 G 47.

général pas constituer une charge financière importante pour les fabriques de ces églises. Ces chiffres rejoignent ceux évoqués par P. Benoit au colloque *Pierre et métal dans le bâtiment au Moyen Age*, qui estimait à 6 à 10 % la part du métal dans la construction³⁰. En revanche, le fer peut représenter une assez grande part de certains ouvrages comme les couvertures ou les vitraux. Pour les verrières, la part de la dépense du serrurier représente de 10 à 40 % du prix total du vitrail³¹. Le prix des clous dans les couvertures est souvent important : en 1488-1489, avec 45 l. 2 s. 10 d. t., ils atteignent 14 % de la totalité des matières achetées pour la couverture de la nef de la cathédrale de Troyes³². La récupération du vieux métal, si elle est possible, permet alors d'alléger notablement le coût de la construction, comme entre 1430 et 1433 lors de la rénovation des baies hautes du chœur de la cathédrale de Rouen, où les fers des anciennes fenêtres sont systématiquement récupérés et revendus au serrurier, ce qui permet de réduire d'environ un tiers les dépenses de serrurerie³³ (fig. 8). Cette problématique de la récupération a également été abordée par l'étude de l'homogénéité de la composition des inclusions non métalliques sur une centaine d'échantillons de fers de construction. En effet, les rapports entre les différents composés non réduits contenus dans les inclusions de la matrice métallique (principalement Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , CaO , et MgO) ne sont pas susceptibles d'évoluer de la loupe de fer aux différents produits semi-finis obtenus. Ils ne changent pas non plus pour deux opérations réalisées avec le même système minéral-argile-charbon et constituent donc une sorte de signature chimique du système. Une nouvelle approche, qui passe par l'étude de l'homogénéité des inclusions d'un même objet après analyse élémentaire, permet de déterminer si ces fers sont issus d'un fer neuf ou s'ils proviennent plutôt de la récupération de vieux lopins de fers corroyés ensemble³⁴. Dans le cas présent, sur une centaine d'échantillons analysés, au moins deux tiers semblent être faits de fer « neuf ». 5 à 10 % sont en revanche issus de la récupération par corroyage à la forge de plusieurs éléments de fer d'origines différentes. Le fer « neuf » ne résultant pas de l'agglomération de lopins épars semble donc tenir une part relativement importante dans l'approvisionnement des chantiers rouennais comme troyens.

³⁰ En considérant que le fer entre environ pour moitié dans ces dépenses, BENOIT (P.), « Métal et construction en France au Moyen Age », dans CHAPELOT (O.), BENOIT (P.), éd., *Pierre et métal...*, *op. cit.*, p. 359-367.

³¹ L'HERITIER (M.), *L'utilisation du fer dans l'architecture gothique...*, *op. cit.*, p. 723-726 ; MINOIS (D.), *Le vitrail à Troyes : les chantiers et les hommes (1480-1560)*, Paris, PUPS, 2005, p. 286-289.

³² Il est toutefois précisé qu'une partie des tables de plomb constituant le fûtage est issue des stocks de l'église.

³³ L'HERITIER (M.), *L'utilisation du fer dans l'architecture gothique...*, *op. cit.*, p. 156-157 et-726 ; Arch. dép. Seine-Maritime, G 2487, G 2489, G 2490 et G 2491.

³⁴ Pour plus de détails sur le protocole analytique, se référer à DILLMANN (Ph.), L'HERITIER (M.), « Tracing supply and smelting processes... », *op. cit.*

D'après les comptes, ce fer est le plus souvent de provenance locale ou régionale. Pour la ville de Troyes par exemple, les régions avoisinantes du pays d'Othe et de la contrée du Der³⁵, ainsi que la production de l'abbaye du Reclus (Marne) semblent assurer l'essentiel de l'approvisionnement des marchés troyens au cours du XVe siècle³⁶ (fig. 9). Les régions d'approvisionnement peuvent donc varier au gré des campagnes de construction. Grâce aux avancées exposées ci-dessus sur l'étude des inclusions non métalliques contenues dans la matrice des fers anciens, il est désormais possible de vérifier si un groupe d'objets ferreux homogènes provient ou non d'une même source d'approvisionnement, en comparant entre elles les signatures chimiques des différents échantillons³⁷ (fig. 10). Ce fer est le plus souvent acheté par le procureur de la fabrique à un ou plusieurs marchands sous forme de bandes ou barres de fer. Les constatations apportées, d'une part par l'archéologie expérimentale sur la difficulté de produire des pièces de grandes dimensions à la seule force humaine³⁸ et d'autre part relatives à l'utilisation d'une grande quantité de tirants de grande longueur et d'assez forte section dans les églises gothiques dès le XIII^e siècle, ne laissent que peu de doutes sur le rôle important joué par le marteau hydraulique dans la production de ces grosses barres de fer. Les ultimes étapes de mise en forme sont ensuite réalisées par un serrurier ou maréchal urbain dans son atelier.

Nature et mise en forme des fers de construction : des alliages ferreux « standards » pour l'époque médiévale

Les alliages ferreux mis en œuvre dans les églises troyennes et rouennaises sont essentiellement issus de bas fourneaux pendant toute la période médiévale. Les analyses

³⁵ BOUTIOT (T.), *Notes sur les anciennes exploitations métallurgiques des contrées composant le département de l'Aube*, Paris, Imprimerie impériale, 16 p. ; VERNA (C.), *Les mines et les forges des Cisterciens en Champagne méridionale et en Bourgogne du Nord, XII^e-XV^e siècles*, Paris, A.E.D.E.H.-Vulcain, 1995, 96 p ; ROUILLARD (J.), *L'homme et la rivière...*, *op. cit.* ; CAILLEAUX (D.), « Les religieux et le travail du fer en Pays d'Othe », dans BENOIT (P.), CAILLEAUX (D.), éd., *Moines et métallurgie dans la France médiévale*, Paris, A.E.D.E.H., 1991, p. 193-212.

³⁶ L'HERITIER (M.), *L'utilisation du fer dans l'architecture gothique...*, *op. cit.*, p. 733-741.

³⁷ DILLMANN (Ph.), L'HERITIER (M.), « Tracing supply and smelting processes... », *op. cit.*

³⁸ CREW (P.), CREW (S.), « The experimental production of bar iron », dans MANGIN (M.), éd., *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen, archéologie et archéométrie, Actes du colloque de Besançon, 10-13 novembre 1993*, Paris, Les Belles Lettres, 1994, p. 175-176 ; LEROY (M.), MERLUZZO (P.), FLUZIN (Ph.), LECLERE (D.), AUBERT (M.), PLOQUIN (A.), « La restitution des savoir-faire pour comprendre un procédé technique : l'apport de l'expérimentation en archéologie du fer », dans PETREQUIN (P.), FLUZIN (Ph.), THIRIOT (J.), BENOIT (P.), dir., *Arts du feu et production artisanale, XX^{es} Rencontres internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes*, Antibes, APDCA, 2000, p. 37-52 ; L'HERITIER (M.), *L'utilisation du fer dans l'architecture gothique...*, *op. cit.*, p. 782.

métallographiques réalisées sur une centaine d'échantillons prélevés sur une dizaine d'églises du nord de la France, relayées par les données des sources écrites, montrent que le fer de la filière indirecte ne fait pas son apparition sur les chantiers avant le milieu du XVe siècle pour les régions les plus précoces. Dans ces régions, il ne supplante vraisemblablement le fer de réduction directe qu'à partir du XVIe siècle³⁹.

Ce fer de réduction directe est un matériau très hétérogène. Il s'agit souvent d'un mélange de fer et d'acier, parfois phosphoreux et systématiquement rempli d'inclusions non métalliques⁴⁰ (fig. 11 et 12). La mise en forme à la forge des pièces de fer mises en œuvre dans le bâti est généralement rudimentaire. L'aspect final des barlotières, des attaches de statues ou des diverses agrafes rappelle en effet le plus souvent la forme de la barre de fer à partir de laquelle ces armatures ont été forgées. Le fer employé dans la construction aux périodes médiévale et moderne est donc plutôt un matériau très ordinaire pour l'époque. Produit en masse, après une phase d'épuration plutôt peu poussée, il ne fait pas l'objet d'un tri, ni ne reçoit de traitements thermo-chimiques spécifiques à la forge destinés à lui conférer des propriétés particulières comme par exemple la trempe ou la cémentation. Seule exception à ce jour, certains tirants découverts au Palais des Papes d'Avignon, dont la matrice métallique est composée d'un acier relativement homogène et bien épuré de ses inclusions. Ces barres auraient coûté deux fois et demi le prix de barres de fer « standard »⁴¹.

Les questions du comportement mécanique de ces « fers » de construction et de leur capacité à absorber les contraintes auxquelles il seront soumis dans la maçonnerie sans se briser découle naturellement de leur composition et de leur hétérogénéité de structure. La présence d'inclusions dans la matrice peut diminuer les propriétés plastique du matériau. De même le phosphore, même présent en très faibles quantités, fragilise le fer à froid ainsi que lors d'un forgeage à chaud⁴². Les premiers essais de traction réalisés par A. Juhin et I. Guillot sur une dizaine de fers de construction du donjon du château de Vincennes ont montré que le comportement mécanique de ces alliages ferreux est très hétérogène et par conséquent

³⁹ *Ibid.*, p. 758-773.

⁴⁰ Le fer de réduction indirecte bien que moins carburé n'en reste pas moins extrêmement hétérogène (phosphore, inclusions...) avant l'apparition des procédés d'affinage en phase liquide dans la seconde moitié du XIXe siècle (procédés Bessemer, Martin et Thomas).

⁴¹ BERNARDI (Ph.), DILLMANN (Ph.), « Stone skeleton or iron skeleton... », *op. cit.*

⁴² STEWART (J. W.), CHARLES (J. A.), WALLACH (E. R.), « -Iron-phosphorus-carbon system, Part 1- Mechanical properties of low carbon iron-phosphorus alloys », *Materials Science and Technology*, vol. 16, Cambridge, 2000, p. 275-282.

difficile à prévoir⁴³. La résistance et la capacité de déformation de ces armatures de fer médiévales sont toutefois systématiquement bien moindres que celles des fers contemporains.

Il faut pourtant relativiser cette qualité du produit fini : un matériau aux caractéristiques microstructurales hétérogènes peut en effet être amplement suffisant mécaniquement s'il est correctement dimensionné par rapport à l'usage auquel il est destiné. Or, la plupart des éléments de fer observés sur les églises rouennaises et troyennes sont restés en place depuis leur mise en œuvre et ne se sont ni rompus ni fissurés, sauf quand ils ont été gagnés par la corrosion. Et si les mentions de fers rompus sont bien nombreuses dans les archives comptables de la fabrique, elles ne concernent que rarement les fers de construction : à l'exception de rares exemples, comme la rupture en 1840 du chaînage de consolidation du transept sud de la cathédrale de Troyes installé en 1713 qui a entraîné la ruine de cette partie de l'édifice, la plupart des mentions de fers brisés sont relatives à la partie travaillante de certains outils ou objets comme les clefs ou les battants de cloches. Ces fers de construction ont donc en général rempli leur rôle et on peut affirmer qu'une qualité supérieure n'était nullement requise. Ajoutons de plus que la plupart de ces fers ne sont et n'étaient pas nécessairement constamment en tension ni même soumis à des forces très importantes : certains petits éléments comme les attaches de statues ont plus un rôle de sécurité que de renfort. De même, tirants et chaînages sont parfois uniquement sollicités lors de conditions climatiques particulières⁴⁴. Enfin, dans bien des systèmes d'assemblage, en cas de tension constante de la structure, le facteur limitant est la résistance de la pierre et non celle du métal.

Conclusion

Cet aperçu de la recherche menée depuis quelques années sur les édifices de la période gothique montre la nécessité de travailler avec des équipes de compétences différentes sur une approche interdisciplinaire afin d'appréhender au mieux les différents aspects de l'utilisation des alliages ferreux dans l'architecture. Bien des axes sont encore à développer dans l'étude des fers de construction, en particulier la question des caractéristiques mécaniques des fers employés dans ces constructions et leurs rôles dans la dynamique des monuments. Des

⁴³ JUHIN (A.), *Structure métallographique et comportement mécanique des tirants de fer du donjon du château de Vincennes*, Mémoire de M2 de Science des matériaux et nano objets (universités Paris 6 Pierre et Marie Curie et Paris-Sud 11) sous la direction de Ph. DILLMANN et I. GUILLOT, 2005, 129 p.

⁴⁴ MONNIER (E.), « Des monuments qui jouent avec la mécanique », *Les cahiers de Science et Vie*, n° 69, Sciences et techniques des bâtisseurs de cathédrales, juin 2002, p. 12-21 ; TAUPIN (J.-L.), « Le fer des cathédrales »..., *op. cit.*

travaux sont actuellement en cours sur ce sujet. En outre, les travaux actuels en archéométrie, d'une part sur l'étude de la diffusion du procédé indirect en Europe occidentale et d'autre part sur la traçabilité d'un objet de fer du minerai ou du site de production jusqu'au produit fini⁴⁵, permettent d'envisager de nouvelles potentialités analytiques susceptible d'enrichir notre connaissance sur ce métal. L'amélioration de la méthodologie présentée et son application à d'autres périodes de l'histoire et d'autres régions du royaume de France et d'Europe seront essentielles pour contribuer à une meilleure connaissance de l'histoire de ces grands monuments.

⁴⁵ Voir à ce sujet les travaux de recherche d'A.-M. Desaulty qui soutiendra une thèse à la fin de l'année 2007.

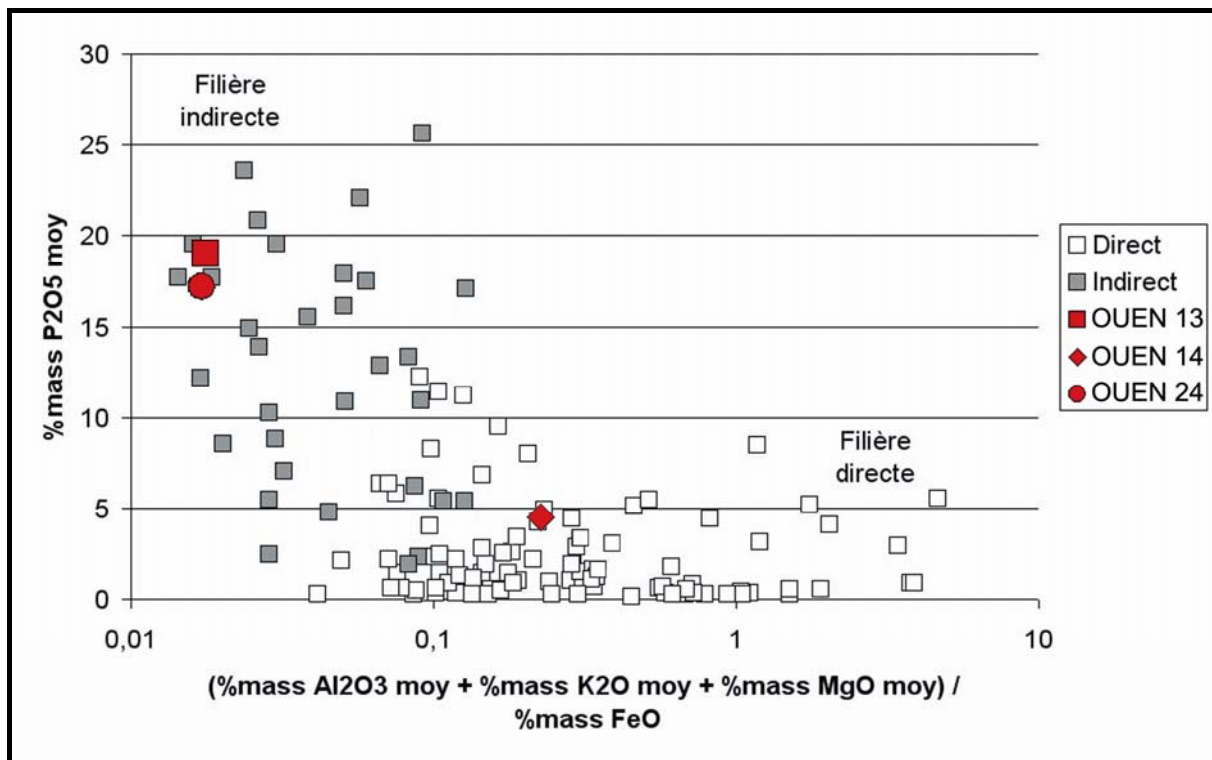
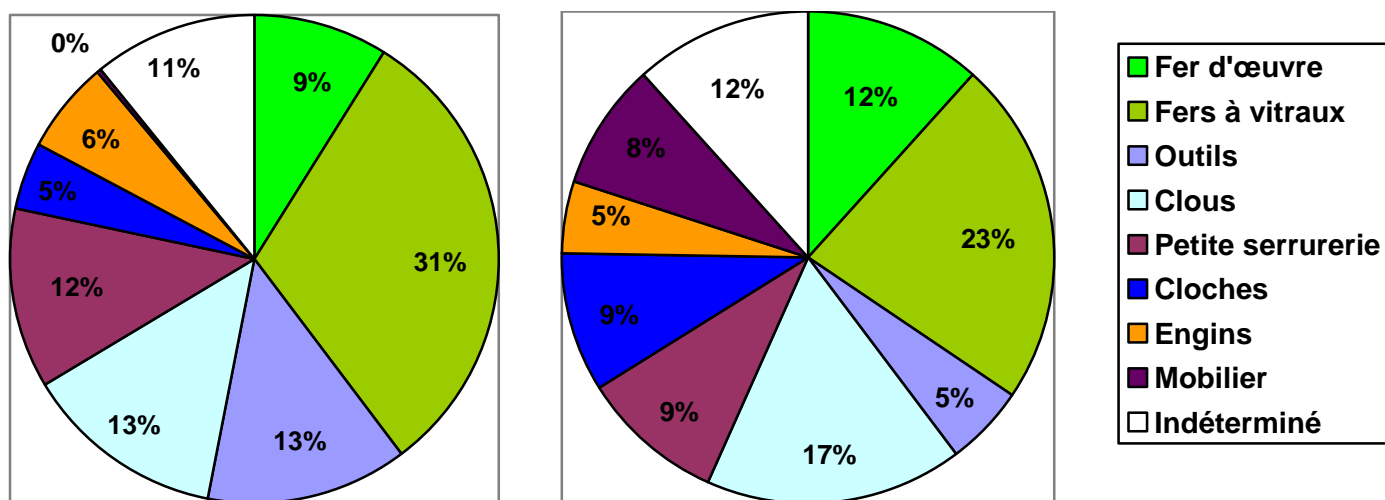


Figure 1 : Abaque permettant de discriminer les procédés de réduction avec exemple d'application pour les goujons prélevés au 3^e étage de la tour de la croisée de l'église Saint-Ouen de Rouen.



Cathédrale de Rouen (1383-1435)

Cathédrale de Troyes (1293-1521)

Figure 2 : Part des différents types de dépenses pour forge d'après les comptes des fabriques des cathédrales de Rouen et de Troyes.

Edifice	Masse de fer dans les vitraux
Cathédrale de Rouen	15 tonnes
Saint-Ouen de Rouen	25 tonnes
Saint-Maclou de Rouen	5,5 tonnes
Cathédrale de Troyes	25 tonnes
Saint-Urbain de Troyes	9 tonnes (12 tonnes avec les baies hautes de la nef qui datent du XIX ^e s.)
Saint-Jean-au-Marché de Troyes	5 tonnes
Sainte-Madeleine de Troyes	2,5 tonnes
Cathédrale de Bayeux	10 tonnes
Cathédrale de Sées	7,5 tonnes
Cathédrale de Coutances	3,5 tonnes
Cathédrale d'Evreux	12 tonnes
Cathédrale du Mans	19 tonnes

Figure 3 : Estimations des quantités de fer mises en œuvre dans les vitraux de certaines églises gothiques.

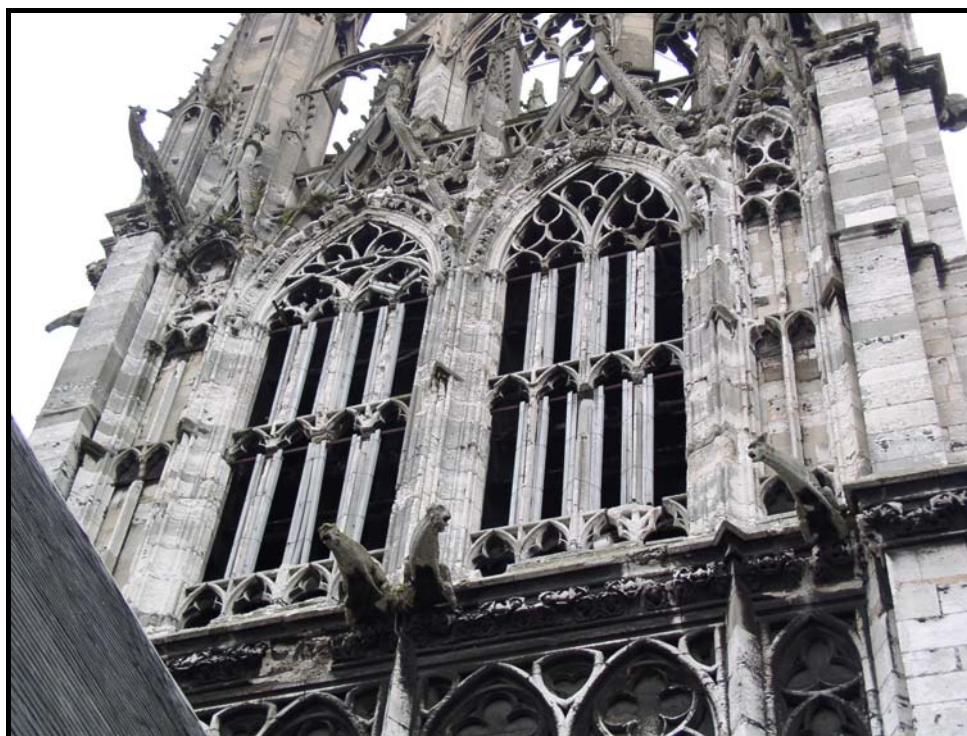


Figure 4 : Chainages du parement extérieur du 2^e étage de la tour de la croisée de l'église Saint-Ouen de Rouen.

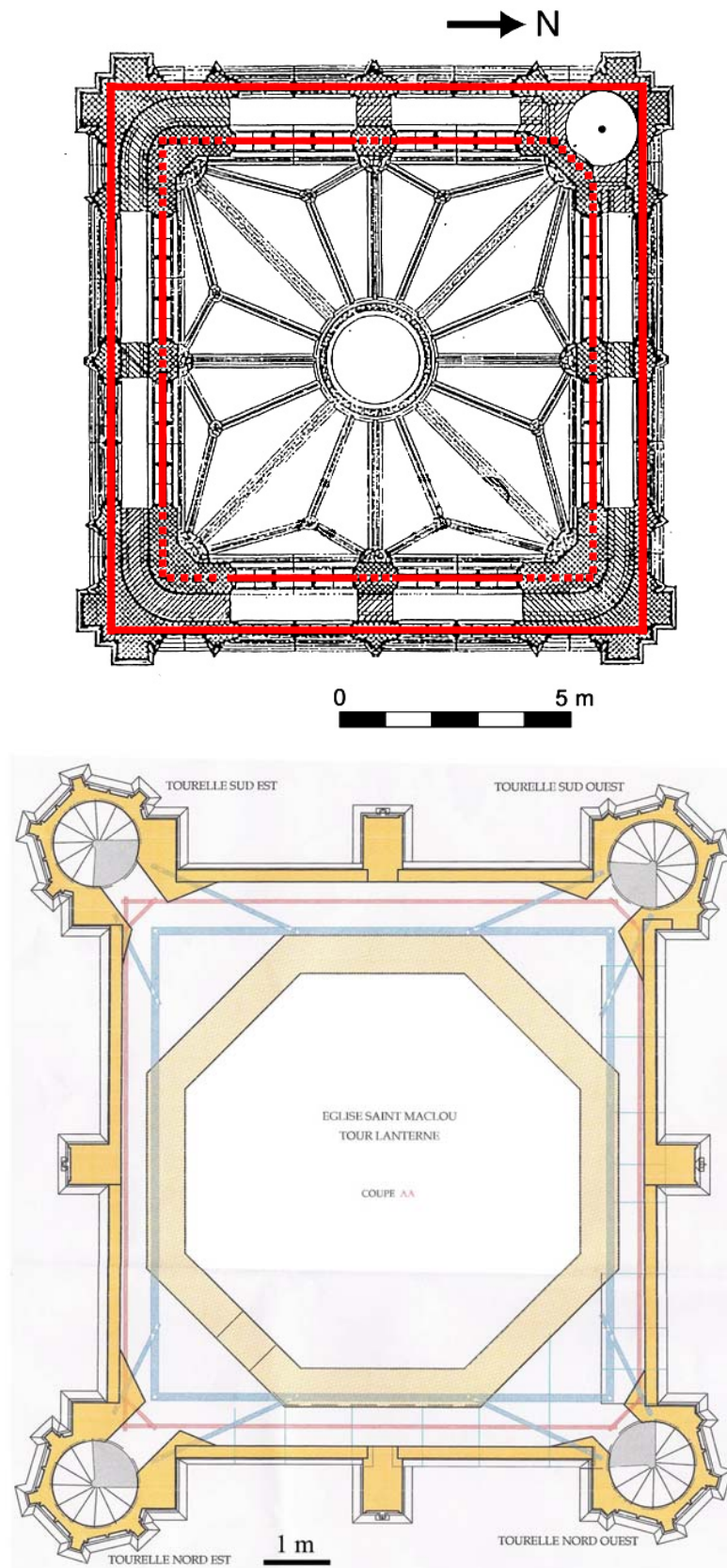


Figure 5 : En haut, plan des tirants et chaînages du 2^e étage de la tour de la croisée de l'église Saint-Ouen, dessin M. L'Héritier d'après un plan de D. Moufle, A.C.M.H. En bas, chaînages retrouvés dans la maçonnerie de la tour-lanterne de l'église Saint-Maclou. En rouge, chaînage du XV^e siècle. En bleu, chaînage du XIX^e siècle, dessin Entreprise Lanfry.



Figure 6 : Détail de l'armature de vitraux du chœur de l'église Saint-Ouen de Rouen montrant des barlotières-tirants de plus forte section.

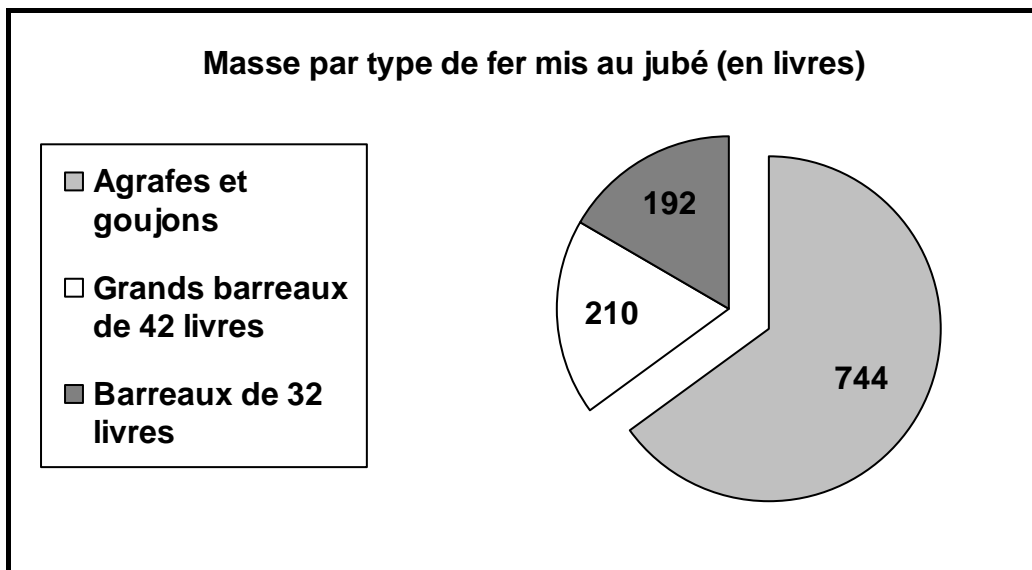


Figure 7 : Types d'éléments et quantités de fer mis au jubé de la cathédrale de Troyes entre 1382 et 1399.

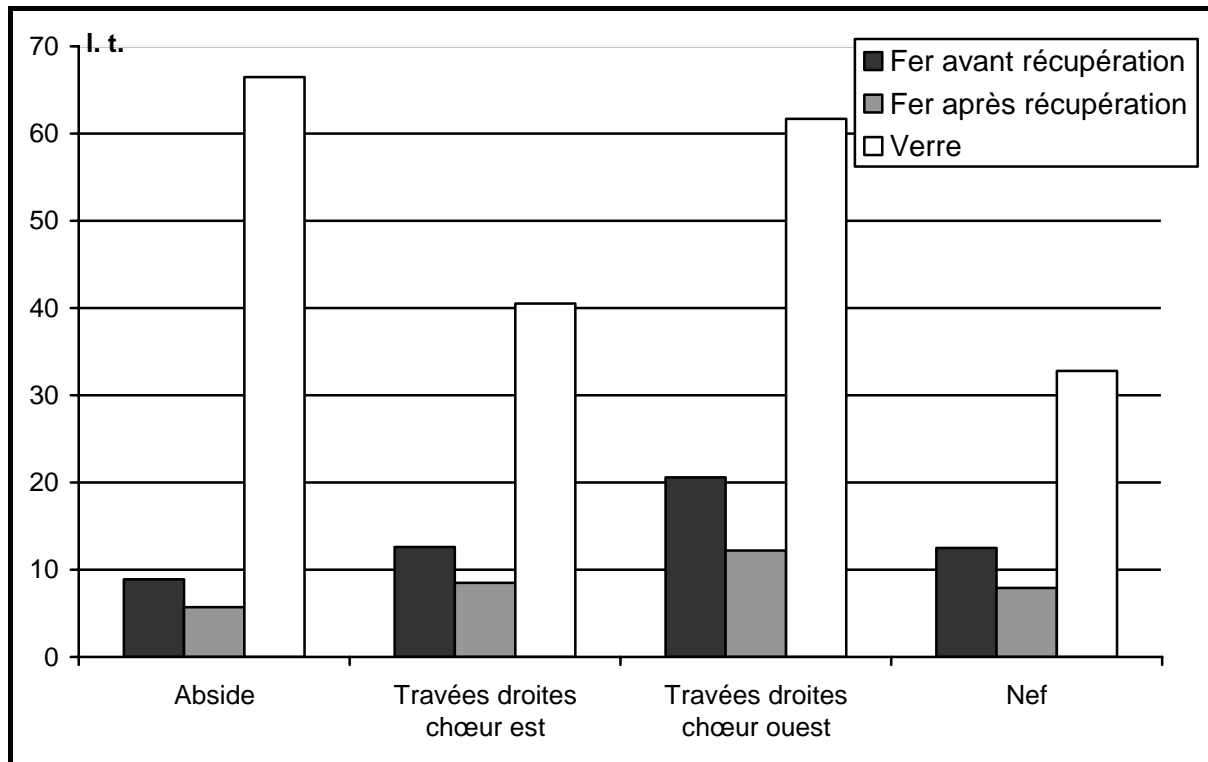


Figure 8 : Prix du fer et du verre dans la réalisation des vitraux des baies hautes de la cathédrale de Rouen d'après les comptes de la fabrique.

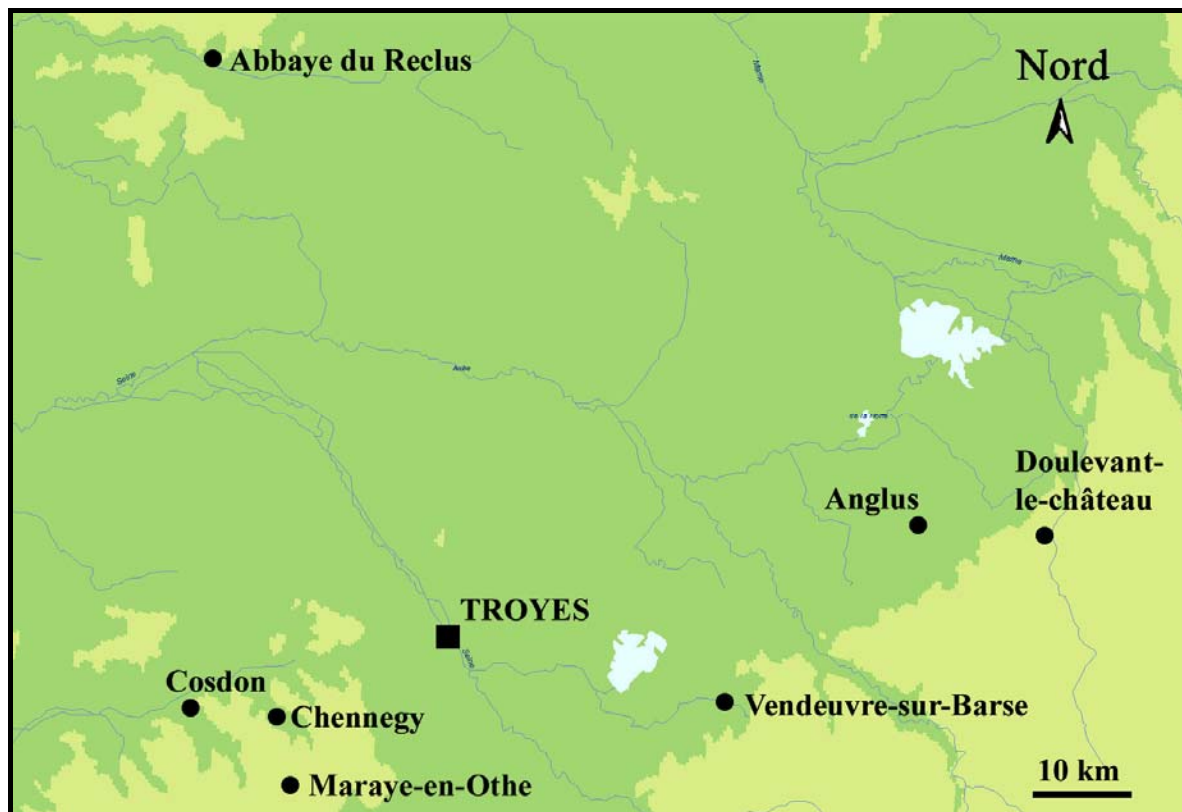


Figure 9 : Localisation des lieux d'approvisionnement en fer pour les chantiers troyens d'après les comptes de la fabrique.

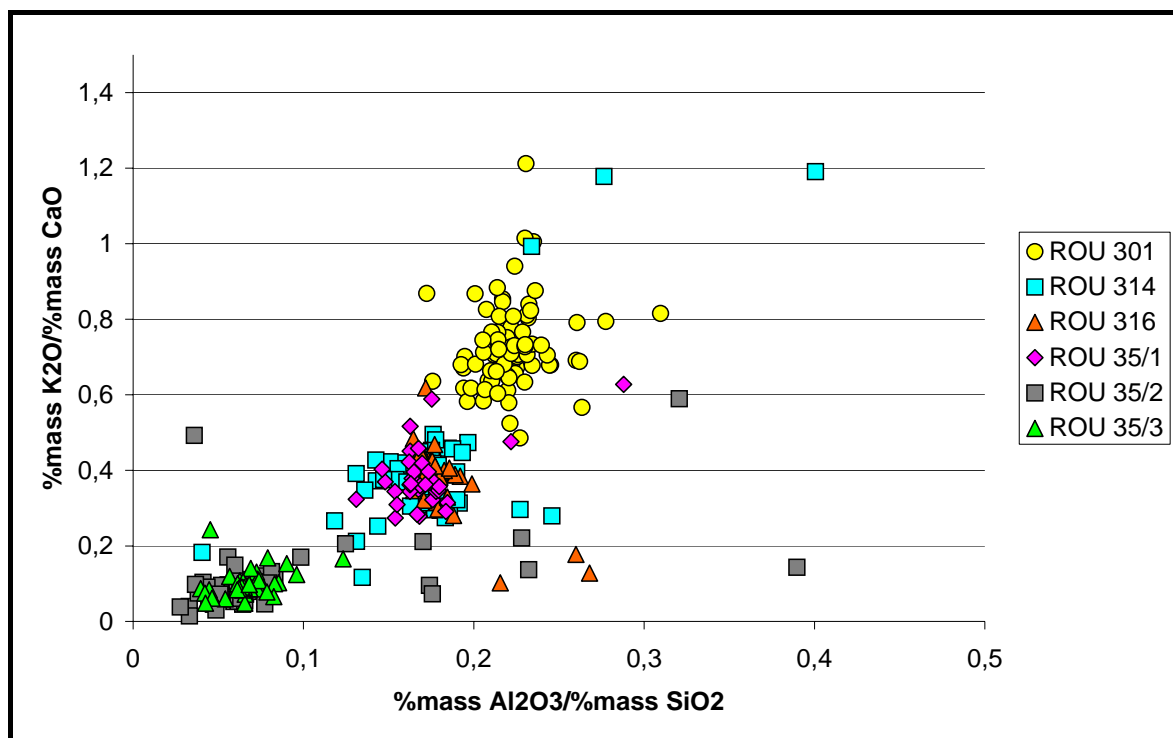


Figure 10 : Mise en évidence par analyse élémentaire des inclusions non métalliques d'au moins trois provenances distinctes pour les attaches de statues de la façade occidentale de la cathédrale de Rouen.

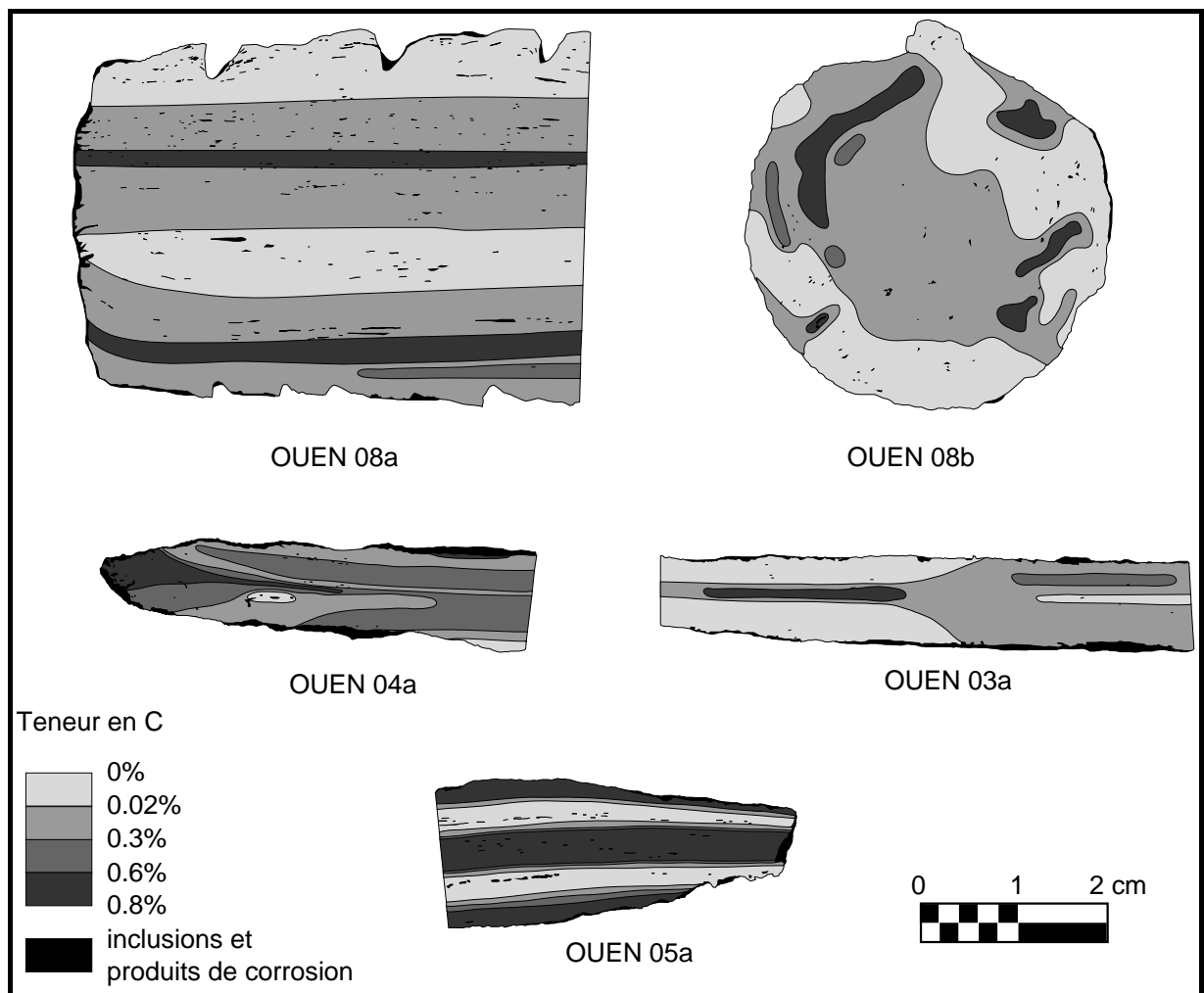


Figure 11 : Variation de la teneur en carbone dans la matrice de goujons et d'agrafes prélevés dans les pinacles du transept nord-ouest de l'église Saint-Ouen de Rouen. Les structures en bandes ne sont que la conséquence de l'aplatissement par martelage d'un lopin hétérogène.

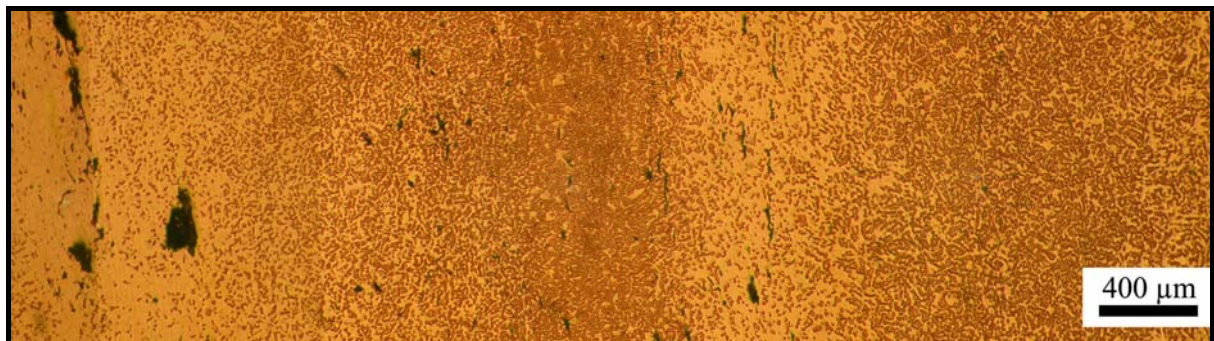


Figure 12 : Micrographie de la matrice de la section OUEN 04a, attaque Nital. Matrice hétérogène avec présence d'inclusions et d'une structure en bandes (zones carburées en foncé, zones ferritiques en clair).