



HAL
open science

Produire, échanger, utiliser les métaux ferreux au Moyen Âge : nouveaux éclairages interdisciplinaires

Philippe Dillmann, Maxime L'Héritier, Alexandre Disser, Stéphanie Leroy,
Enrique Vega

► To cite this version:

Philippe Dillmann, Maxime L'Héritier, Alexandre Disser, Stéphanie Leroy, Enrique Vega. Produire, échanger, utiliser les métaux ferreux au Moyen Âge : nouveaux éclairages interdisciplinaires. Henigfeld Yves, Husi Philippe, Ravoire Fabienne. L'objet au Moyen Âge et à l'époque moderne : fabriquer, échanger, consommer et recycler. Actes du XIe congrès international de la Société d'Archéologie Médiévale, Moderne et Contemporaine, Publications du CRAHM, pp.197-210, 2020. hal-03070433

HAL Id: hal-03070433

<https://hal.science/hal-03070433v1>

Submitted on 29 Jan 2025

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.

PRODUIRE, ÉCHANGER, UTILISER LES MÉTAUX FERREUX AU MOYEN ÂGE :

NOUVEAUX ÉCLAIRAGES INTERDISCIPLINAIRES



Philippe DILLMANN¹, Maxime L'HÉRITIER², Alexandre DISSER³, Stéphanie LEROY⁴ et Enrique VEGA⁵

Introduction

Ces dernières années, les approches appliquées aux métaux ferreux se sont enrichies de nouvelles méthodes archéométriques concernant les études de provenance, la datation absolue des aciers par dosage du radiocarbone, et la détermination des procédés sidérurgiques mis en œuvre pour la transformation du minerai en métal. Ces nouvelles avancées interdisciplinaires sur les objets métalliques se placent dans l'héritage direct des travaux qui portent sur les chaînes opératoires de production des métaux et l'évolution des procédés, réalisés depuis les années 1980 notamment par les équipes de Paul Benoit, Philippe Fluzin, Alain Ploquin et Claude Domergue⁶. Les approches en archéologie expérimentale menées sur le thème de la production des métaux ferreux ont par ailleurs été fondamentales dans cette démarche⁷. Ce n'est en effet qu'une fois appréhendés les gestes techniques de la chaîne opératoire du fer et leurs évolutions, que les méthodes présentées dans cette contribution ont pu être mises en place. C'est également cette connaissance fine de la chaîne opératoire qui a permis de sélectionner les informations physico-chimiques

pertinentes afin de reconstituer l'histoire thermomécanique de l'objet mais également de tester des hypothèses de provenance par comparaison de signatures chimiques. Précisons également que l'ensemble des informations sur la vie technique de l'objet, même si elles se fondent sur des concepts physico-chimiques, doivent être considérées comme étant de nature historique, comme une source supplémentaire à confronter aux textes, à l'iconographie ou aux vestiges archéologiques.

Les premières applications de ces développements méthodologiques ont été réalisées dans le cadre des recherches menées depuis les années 2000 sur l'emploi du fer dans les grands monuments gothiques médiévaux (agrafes, goujons, tirants). Ces recherches visaient à la fois à mieux comprendre l'organisation des chantiers et la pensée constructive médiévale mais également à éclairer de nouveaux aspects de la sidérurgie. Elles ont également permis de contribuer au développement des avancées méthodologiques que nous présentons ici. Les exemples proposés dans cette contribution sont donc tirés de cette thématique d'étude. Nous allons tenter de montrer comment les approches archéométriques contribuent à répondre à

1. LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA (UMR 5060), université Paris-Saclay.
2. Université Paris VIII, Département d'histoire/HISPOSS (EA 1571).
3. LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA (UMR 5060), université Paris-Saclay.
4. LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA (UMR 5060), université Paris-Saclay.

5. LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA (UMR 5060), université Paris-Saclay.
6. On pourra à cet effet consulter les nombreuses publications de ces auteurs: FLUZIN, PLOQUIN & SERNEELS 2000; FLUZIN 1993; DOMERGUE 1993; GUILLOT *et al.* 1991.
7. TEREYGEOL 2013.

certaines questions liées à la métallurgie, mais également à l'organisation des marchés médiévaux du fer et de ses alliages, autour des grands chantiers monumentaux.

Mutation des procédés sidérurgiques

Nous ne reviendrons pas en détail sur l'exposé technique de la grande mutation des procédés sidérurgiques de la seconde moitié du Moyen Âge, qui repose en grande partie sur l'usage de la force hydraulique à la fois pour la ventilation des fourneaux et pour la transformation du métal avec le marteau hydraulique⁸. On pourra trouver dans différents ouvrages et articles une synthèse des données actuelles sur l'apparition et la diffusion de ce nouveau procédé⁹, dit indirect, apportant une étape supplémentaire dans la chaîne opératoire par rapport au procédé ancien (le procédé direct). Cette étape est celle de la production de fonte¹⁰, qu'il faut ensuite décarburer pour obtenir du fer ou de l'acier lors de l'affinage. Ce nouveau procédé, une fois stabilisé sous sa forme wallonne¹¹, a permis la production de plus grandes quantités de métal et a constitué un changement majeur dans le paysage sidérurgique de l'extrême fin du Moyen Âge. On sait également grâce aux sources écrites et aux données archéologiques concernant les sites de production que ce procédé apparaît vraisemblablement dans le nord de l'Europe au XIII^e siècle¹² et se répand progressivement vers le sud en passant successivement par le nord-ouest de l'Allemagne, où il est présent au XIV^e siècle¹³, la Belgique et en particulier la Wallonie¹⁴, où il prendra le nom de « procédé wallon » en acquérant une organisation spécifique à deux foyers (affinage et chauffe), puis la Champagne, 30 ans plus tard¹⁵, la Bourgogne et le Nivernais au tournant des XIV^e

et XV^e siècles¹⁶, la Normandie dans la seconde moitié du XV^e siècle¹⁷, et enfin l'Angleterre au XVI^e siècle.

Il a été montré par de nombreuses études initiées à la fin du XX^e siècle et amplifiées dans les années 2000 que d'importantes quantités de métal ont été utilisées dans les monuments gothiques médiévaux lors de leur construction¹⁸, dont les dates croisent précisément celles de la diffusion du nouveau procédé indirect dans le nord de l'Europe. Il s'avérait donc intéressant de pister les indices de ce nouveau procédé dans le métal mis en œuvre dans ces monuments pour appréhender de manière concrète l'ampleur prise par cette innovation technique sur le marché du fer. Ceci est rendu possible par le fait que la composition chimique des impuretés non métalliques (les inclusions) piégées au sein de ce métal lors des étapes de réduction est au premier chef influencée par la nature de la filière sidérurgique (directe ou indirecte)¹⁹. Un corpus de référence constitué d'objets issus de manière indubitable de la filière directe ou de la filière indirecte a été constitué et il est aujourd'hui possible de comparer la composition des inclusions d'un objet archéologique donné avec ce corpus de référence²⁰. Ainsi, le procédé de réduction utilisé pour les fers de renfort des différents monuments étudiés a pu être déterminé.

Ces fers ont pu être datés par analyse archéologique du bâti et plus récemment par la mise en place de techniques radiocarbone, fondées sur l'extraction des carbures de l'acier. En effet, le carbone donnant naissance à ces carbures provient du charbon de bois utilisé pour la réduction du minerai. Il est possible d'extraire une partie de ce carbone et de doser la quantité de ¹⁴C qu'il contient, ce qui permet de le dater. Il convient de préciser que les procédés sidérurgiques anciens génèrent rarement des matériaux homogènes²¹. Il est donc nécessaire, afin de localiser le carbone dans l'acier, de procéder préalablement à une étude métallographique la

8. Première mention en 1135, voir : VERNA & BENOIT 1990.

9. AWTY 2007 ; BELHOSTE *et al.* 1991.

10. Un alliage de fer contenant entre autres plus de 2% de carbone, ce qui le rend apte au moulage mais cassant.

11. DILLMANN *et al.* 2012 ; AWTY 2007.

12. BINDLER *et al.* 2011.

13. JOCKENHÖVEL 2013.

14. GILLARD 1971.

15. À Estissac, dans l'Aube : ROUILLARD 2003.

16. BELHOSTE & LÉON 1996.

17. BELHOSTE *et al.* 1991 ; DILLMANN *et al.* 2012.

18. Pour de plus amples informations à ce sujet, on pourra se référer aux travaux spécifiques sur les différents monuments : palais des Papes d'Avignon (BERNARDI & DILLMANN 2003 ; BERNARDI & DILLMANN 2005 ; BERNARDI & DILLMANN 2007 ; DILLMANN & BERNARDI 2003), cathédrales et églises de Rouen et de Troyes (L'HÉRITIER 2004 ; L'HÉRITIER 2009 ; L'HÉRITIER & DILLMANN 2011 ; L'HÉRITIER, DILLMANN & BENOIT 2005 ; L'HÉRITIER, DILLMANN & BENOIT 2010), cathédrales d'Amiens,

de Soissons et de Beauvais (DILLMANN 2009), d'Auxerre (AUMARD, DILLMANN & L'HÉRITIER 2011), de Coutances (L'HÉRITIER 2012), de Metz (DISSER 2014 ; DISSER *et al.* 2014), de Chartres (LEFEBVRE & L'HÉRITIER 2014 ; L'HÉRITIER *et al.* 2014), basilique de Saint-Denis (L'HÉRITIER 2015), donjon du château de Vincennes (CHAPELOT 2003), églises liégeoises (MAGGI *et al.* 2012).

19. Cela est dû notamment au fait que certains éléments sont éliminés de la chaîne opératoire en passant dans la scorie et ne se retrouvent pas dans l'objet pour le procédé direct, mais que d'autres au contraire se concentrent dans la fonte et sont donc également concentrés dans les impuretés piégées dans le métal du procédé indirect. Pour plus de détails, on consultera DISSER *et al.* 2014 ; DILLMANN & L'HÉRITIER 2007.

20. La réalisation de ces analyses se fait par spectrométrie EDS (pour *Energy Dispersive Spectrometry*) couplée au microscope électronique à balayage (MEB). Elle nécessite de réaliser un prélèvement sur l'objet. Plus la taille de ce prélèvement est importante, plus les mesures seront représentatives, l'idéal étant de réaliser une coupe transversale complète de l'objet.

21. On a pu parler de « métallurgie de l'hétérogène » (DILLMANN, PEREZ & VERNA 2011).

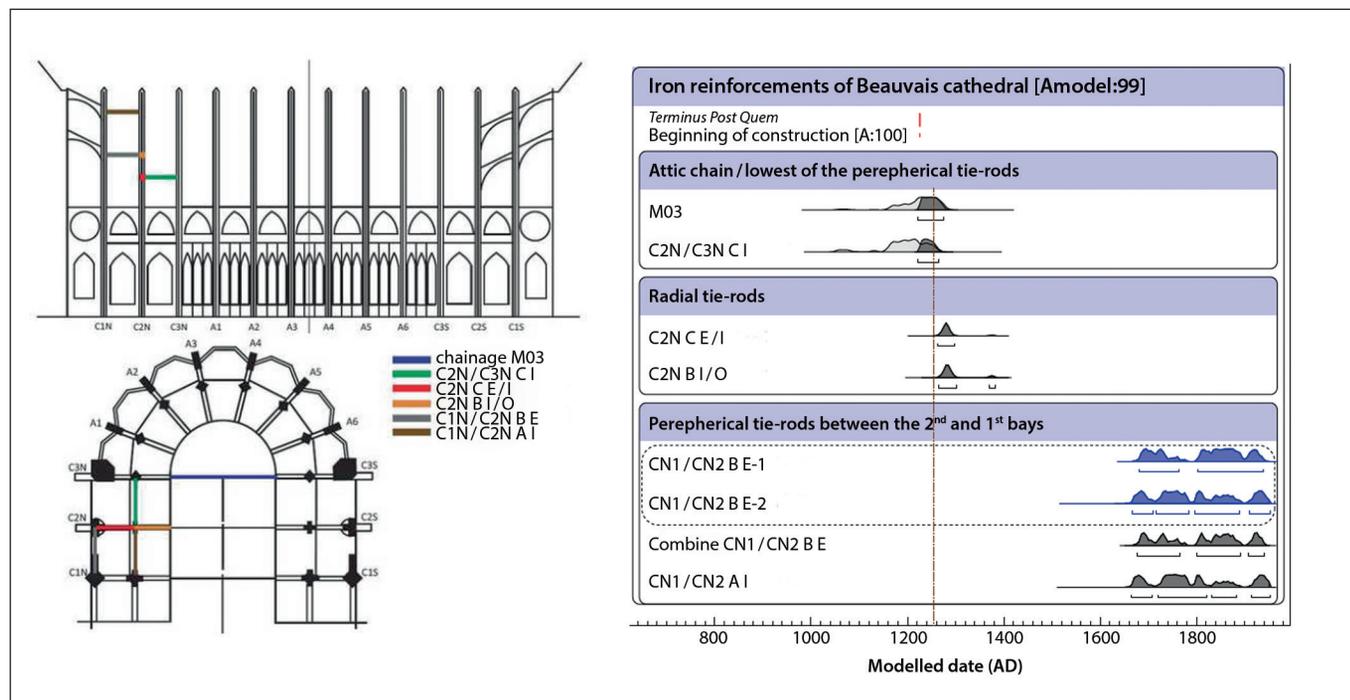


Fig. 1 Positions et datation des renforts métalliques de la cathédrale de Beauvais. Pour l'échantillon CN1/CN2 B E, la date est obtenue à partir de la combinaison de deux dates (CN1/CN2 B E-1 et CN1/CN2 B E-2). D'après LEROY *et al.* 2015b.

plus détaillée possible de l'objet. La figure ci-dessus montre un exemple de datation réalisée sur différents éléments de renfort de la cathédrale de Beauvais et plus particulièrement les tirants placés entre les arcs boutants (fig. 1). Ces datations valident la mise en place de la majorité des tirants au XIII^e siècle lors de la construction de la cathédrale et permettent de mieux saisir les stratégies des bâtisseurs²². Elles permettent également de repérer les éléments mis en place (ou remplacés) au XVIII^e siècle et donc de documenter l'histoire postérieure du monument.

Sur la figure ci-après, les diagrammes circulaires représentent la part des objets issus des filières directe (bleu) et indirecte (rouge) à différentes périodes pour les monuments sur lesquels ont été analysés les renforts métalliques (fig. 2)²³. Au XIII^e siècle, la totalité des renforts, quelle que soit la localisation des monuments étudiés, a été réalisée avec du fer issu de la filière directe, ce qui est en bon accord avec les données textuelles et archéologiques pour les sites de production. Pour la première moitié du XIV^e siècle, on voit que le procédé direct reste majoritaire sur tous les monuments.

Ainsi, il est le seul employé à Rouen, Troyes et Auxerre. En revanche, environ un tiers des fers analysés dans les églises de Liège sont issus du procédé indirect. À notre connaissance, cette occurrence devance légèrement les premières mentions historiques pour le procédé dans la région²⁴. Pour la fin du XIV^e siècle, on note la présence des premiers fers indirects à la cathédrale d'Auxerre qui constituent un quart des éléments analysés sur ce monument. Les sources écrites identifient l'arrivée du procédé indirect autour de cette région à cette même période²⁵. En revanche, les fers analysés à Liège pour le début du XV^e siècle ne présentent plus trace du nouveau procédé : tous proviennent de la réduction directe en bas-fourneaux (période non représentée sur la figure). Cinquante ans plus tard (période 1450-1500), le paysage sidérurgique est radicalement différent puisqu'on observe la présence de fers indirects sur l'ensemble des bâtiments étudiés, que ce soit à Metz où la première mention d'une affinerie dans la région remonte à 1445-1446 (forge de Vaux) et celle d'un haut-fourneau en 1495²⁶, à Amiens, Rouen ou Troyes. Cette concordance parfaite des données

22. LEROY *et al.* 2013; LEROY *et al.* 2015a; LEROY *et al.* 2015b.

23. Ces analyses concernent plus d'une centaine d'éléments de fer. On en trouvera le détail dans les publications associées et notamment MAGGI *et al.* 2012; DILLMANN & L'HÉRITIER 2007; DILLMANN 2009; AUMARD, DILLMANN & L'HÉRITIER 2011.

24. Qui ne sont pas antérieures au milieu du XIV^e siècle (AWTY 2007).

25. BELHOSTE & LÉON 1996.

26. LEROY 1997; LEROY 1998; HORIKOSHI 2008.

de l'archéométrie avec celles issues des autres sources ne doit pas masquer une autre information, uniquement perceptible ici par les analyses physico-chimiques : celle de la perdurance du procédé direct, bien après l'apparition du procédé indirect et ce dans les zones mêmes où ce dernier s'est diffusé. Ainsi, dans les régions où le nouveau procédé se développe de manière précoce comme en Wallonie, l'analyse physico-chimique révèle que sa diffusion est extrêmement longue et que, près de 100 ans plus tard, les bas-fourneaux semblent toujours être la source majoritaire du fer. De même, sur l'ensemble du territoire étudié, dans la seconde partie du XV^e siècle, une part non négligeable des éléments métalliques identifiés sur les cathédrales reste issue de l'ancienne filière. Une part de recyclage est aussi probablement à prendre en compte²⁷. Il est possible de détecter ce recyclage dans le matériau analysé quand il résulte de la soudure de plusieurs éléments d'origines distinctes. Le remploi, consistant en une réutilisation sans modification de forme (ou avec des adaptations très mineures), est quant à lui détecté par la confrontation entre l'analyse du bâti et la datation radiocarbone des éléments ferreux. Cette récupération peut parfois être mise en évidence par les sources écrites comme en 1432-1433 à la cathédrale de Troyes où le serrurier forge des barreaux puis des croches de fer à partir de chaînes de fer récupérées par l'œuvre²⁸ ou en 1548-1549 à l'église Saint-Jean de Troyes où le forgeron reçoit 226 livres de « viel fer » pour forger des agrafes²⁹. Ainsi, s'il ne peut être exclu totalement pour les fers analysés³⁰, le remploi ou le recyclage représente de manière certaine une part très mineure, soit parce que les fers étudiés ont été datés par radiocarbone³¹, soit parce qu'ils ne présentaient aucune trace de recyclage par assemblage d'éléments d'origines différentes.

Cette concomitance des deux filières sidérurgiques a pu être observée par l'archéologie en Lorraine et ce, jusqu'au XVII^e siècle³², mais les résultats archéométriques permettent de généraliser cette observation à tout le nord du royaume de France et ce au moins jusqu'au XVI^e siècle puisque des fers directs sont encore identifiés à cette période (mais de manière cette fois très minoritaire) dans les églises troyennes. Ces observations éclairent l'arrivée progressive du nouveau procédé qui ne remplace pas de manière hégémonique l'ancienne filière dès son introduction. Au contraire, la diffusion s'échelonne sur un à plusieurs siècles. Ceci peut s'expliquer en premier lieu par des raisons économiques, le coût d'installation de l'équipement hydraulique étant loin d'être négligeable notamment en temps de crise. Cette

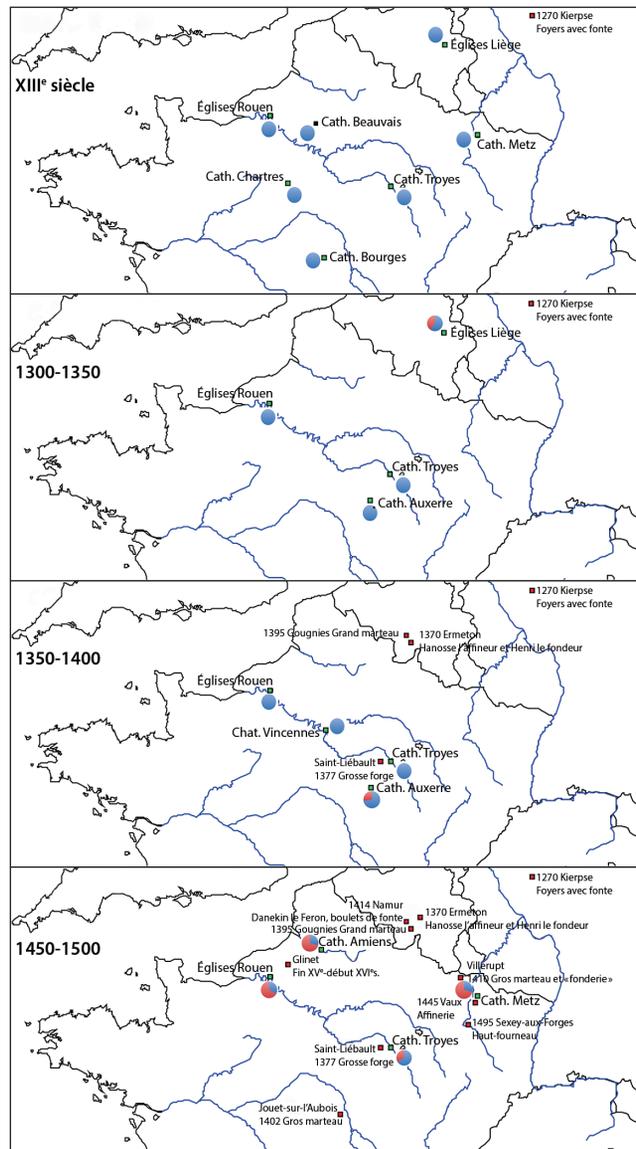


Fig. 2 Occurrences du procédé indirect dans le nord de la France. Diagrammes circulaires : fers de renforts analysés sur les monuments (bleu : part des fers directs ; rouge : part des fers indirects) ; carrés rouges : source écrite ou archéologique révélant la présence du procédé indirect ; carrés verts : localisation des monuments. Doc. P. Dillmann et M. L'Héritier.

étude montre d'ailleurs bien que si des périodes de relative embellie, notamment à la fin du XIV^e siècle, ont été propices à une introduction précoce du procédé dans certaines régions (Champagne, Nivernais...), l'innovation ne

27. DILLMANN & L'HÉRITIER 2009.

28. Arch. dép. Aube, G 1562, fol. 137 r^o.

29. Arch. dép. Aube, 15 G 57, fol. 79 r^o.

30. Pour plus de détails à propos du recyclage, on pourra se référer à la contribution de M. L'Héritier, A. Dissier, S. Leroy et P. Dillmann au sein du présent ouvrage.

31. C'est le cas à Bourges, Metz, Beauvais...

32. LEROY 1998.

s'impose durablement sur l'ensemble du territoire français qu'au sortir de la guerre de Cent Ans lors de la période de reprise économique marquant l'extrême fin du Moyen Âge. Mais les explications sont aussi techniques voire politiques et culturelles et peuvent varier d'une région à l'autre. Brian G. Awty rappelle par exemple l'importance des flux de populations notamment d'origine wallonne et germanique dans l'introduction du nouveau procédé³³. On rappellera également que pour le chaînage mis en place en 1498 dans la cathédrale d'Amiens, les éléments standardisés et massifs ont été réalisés à l'aide du procédé indirect³⁴, alors qu'aux extrémités de chaque tronçon de chaîne, les éléments de fixation forgés à des dimensions spécifiques sont, quant à eux, exclusivement réalisés à l'aide du procédé direct³⁵. De même, l'analyse de pointerolles de la mine Saint-Louis Eisenthür dans les Vosges, datées du XVI^e siècle, réalisée par notre équipe (non publiée), montre une différence de procédés suivant la nature du métal utilisé (fer ou acier) : la pointe en acier étant issue de la filière directe alors que le corps est issu de la filière fonte. Ces données archéométriques posent donc de nouvelles questions sur la place des procédés, anciens et nouveaux, leur diffusion et leur acceptation dans la société médiévale³⁶, que des études futures, menées notamment sur d'autres types d'objets, pourront éclairer.

Organisation des marchés, échange des matériaux et des objets

La question des marchés du fer au Moyen Âge est complexe. Elle touche en effet à des notions techniques et économiques mais également politiques. Les premières peuvent être éclairées par les examens métallographiques qui permettent d'appréhender la qualité des métaux ferreux et donc leur valeur du point de vue technique (comportement mécanique). Les questions liées à la circulation et aux fournitures de matériaux peuvent être, quant à elles, abordées avec un nouvel outil : celui de la signature chimique des ensembles de production (que l'on peut comparer à une

empreinte digitale). Elle peut être retrouvée, ici encore, dans les inclusions des matériaux ferreux³⁷. Cette signature chimique est portée par des éléments chimiques présents en très petites quantités dans le matériau, appelés éléments traces. Elle nécessite donc la mise en place de méthodes d'analyse spécifiques³⁸. Le principe est que les rapports respectifs de certains éléments (les éléments lithophiles) vont rester invariants entre les scories trouvées sur les sites de production (voire dans une certaine mesure les minerais³⁹) et les inclusions piégées dans les objets. Il est alors possible de comparer l'ensemble des rapports des éléments contenus dans les inclusions avec ceux mesurés sur les scories des sites potentiels d'approvisionnement. Chaque ensemble de production doit faire l'objet d'une étude approfondie afin d'évaluer la variabilité de la composition des scories et des minerais qui le définissent. Actuellement, la base de données de l'IRAMAT (laboratoire Archéomatériaux et prévision de l'altération et laboratoire Métallurgies et cultures) constitue un référentiel autorisant l'inter-comparaison pour un grand nombre d'ensembles sidérurgiques situés en France, en Europe occidentale et en Asie du Sud-Est (Cambodge). En l'absence de ces référentiels, il est également possible de comparer des groupes d'objets entre eux afin de vérifier s'ils sont de provenance identique, même si cette dernière ne peut être identifiée. Précisons enfin qu'au vu du grand nombre d'éléments chimiques à considérer et de la variabilité potentielle des signatures chimiques, il est nécessaire de traiter les données de manière statistique afin de réaliser les inter-comparaisons. Différents types d'inférences peuvent être mis en œuvre après normalisation des données (fondées entre autres sur l'analyse en composantes principales, l'analyse linéaire discriminante [ALD], le *clustering* par classification ascendante hiérarchique [CAH])⁴⁰.

Ces méthodes ont été appliquées pour déterminer l'origine des renforts métalliques d'un certain nombre de monuments médiévaux, ce qui a permis d'éclairer les sources d'approvisionnement de plusieurs grands chantiers gothiques. À titre d'exemple, nous allons détailler ici la démarche suivie pour l'étude de la cathédrale de Bourges. Dans ce monument, un certain nombre de renforts

33. AWTY 2007.

34. Ce qui, par ailleurs, semble en contradiction avec la préconisation d'utiliser du fer d'Espagne faite par les experts lors de l'inspection du chantier.

35. DILLMANN 2009.

36. Et notamment leur utilisation différenciée, par les gens de métiers et les commanditaires, selon leur qualité et la spécificité de leur mise en forme.

37. Notons que c'est une information de deuxième ordre : le premier ordre étant l'information sur le procédé qui est donnée par l'analyse des éléments majeurs. Du fait de la nature des processus de formation de ces inclusions, les objets issus de la filière indirecte ne contiennent plus d'information de provenance au sein des inclusions. Les études de

circulation et de provenance ne peuvent donc être effectuées que sur des objets issus de la filière directe. Pour plus d'informations, consulter DILLMANN & BELLOT-GURLET 2014 ; DILLMANN *et al.* 2015.

38. C'est la méthode LA ICP-MS (pour *Laser Ablation Induced Coupled Plasma Mass Spectrometry*) qui est employée. Ajoutons que certaines approches s'intéressent également à la signature isotopique, notamment celle de l'Osmium (BRAUNS *et al.* 2013). Mais ces dernières restent encore limitées dans leurs applications.

39. Si tant est que les phénomènes de pollution par les parois du fourneau et les charbons de bois ne soient pas trop importants lors de l'étape de réduction du minerai.

40. LEROY *et al.* 2014 ; LEROY *et al.* 2012.

métalliques ont été repérés archéologiquement, notamment un chaînage courant dans une partie du triforium (voir plus loin, fig. 5) et des tirants dans les combles des voûtes des bas-côtés⁴¹. L'analyse archéologique du bâti et la datation radiocarbone de l'acier ont permis de relier la pose de ces éléments à la construction de la cathédrale, au XIII^e siècle⁴². La région de Bourges est le siège d'une intense activité métallurgique depuis l'époque biturige, dont témoignent de nombreux ferriers encore en place dans la forêt voisine d'Allogny⁴³. Les sources écrites et archéologiques confirment la poursuite des exploitations à la période médiévale⁴⁴. Un cartulaire du XIII^e siècle révèle l'existence d'exploitations de fer dans la forêt de Saint-Palais au nord de Bourges sur les terres de l'archevêché, dont l'abbaye cistercienne de Loroy, qui cultive des liens étroits avec les membres de la famille de Sully et l'archevêché de Bourges, obtient l'usufruit⁴⁵. Jean-Marie Bordeloup cite également un litige entre l'abbaye de Saint-Sulpice de Bourges et le seigneur de Mehun-sur-Yèvre, Robert de Courtenay, à propos de l'extraction de minerai et de forges forestières⁴⁶. Au sud de Bourges, une douzaine de sites liés à la métallurgie du fer, dont plusieurs sont datés de la période médiévale, ont été découverts par la prospection dans la région de Nozières et Farges-Allichamps⁴⁷. Les sites médiévaux pourraient être en lien avec l'abbaye cistercienne voisine de Noirlac, dont les recettes attestent la place importante de la production du fer au XIII^e siècle⁴⁸. Des prospections ont été réalisées dans la forêt d'Allogny et sur les ferriers de Farges-Allichamps et Nozières (désormais désignés comme Nozières) sur 13 zones archéologiques correspondant chacune à des ferriers⁴⁹. Nous avons utilisé l'analyse linéaire discriminante (ALD)⁵⁰ afin de comparer les compositions chimiques en éléments traces des objets⁵¹ (chaque groupe d'inclusions étant associé à une classe) et celle de Nozières et de la forêt d'Allogny⁵².

La figure ci-après présente la projection sur les deux premiers axes discriminants des points correspondants aux

inclusions des objets (fig. 3). Les ensembles de Nozières et Allogny apparaissent respectivement en rouge et noir sur la figure. Les inclusions des maillons placés dans l'abside, ainsi que quelques maillons de la nef, situés en prolongement de l'abside⁵³, ont été représentés en bleu. On observe que leurs compositions ne sont pas compatibles avec les ensembles de production candidats et forment un groupe isolé. Ces maillons proviennent donc tous d'une même source, différente de celle de la forêt d'Allogny et de l'ensemble « Nozières ». Si l'on effectue une seconde ALD, en excluant ce groupe (fig. 3, à droite), on voit que les compositions chimiques se distribuent maintenant en plusieurs groupes, dont certains ne peuvent être significativement séparés soit des scories d'Allogny, soit de celles de Nozières. D'autres inclusions, bien que de compositions assez proches, restent relativement séparées des ensembles de production.

Nous avons ensuite procédé à une étape supplémentaire de validation en comparant deux à deux en ALD (analyse supervisée) et en classification ascendante hiérarchique (CAH, non supervisée) chacun des objets avec l'espace candidat dont il était le plus proche lors de la seconde ALD. Il est alors possible de distinguer plusieurs types d'objets :

- ceux dont il n'est pas possible de séparer par ALD la signature chimique de celle des espaces candidats et pour lesquels on peut attribuer avec certitude l'origine à l'ensemble de production testé ;
- ceux qui, bien que proches (inséparables par l'analyse CAH, non supervisée), en sont malgré tout séparés par l'ALD. Pour ce type d'échantillon, une provenance issue de l'espace candidat est probable et devra être réinterrogée au vu de nouvelles données (analyse d'échantillons supplémentaires pour définir l'ensemble de production). Un exemple d'un tel cas est donné sur la figure ci-contre pour l'échantillon N15 (fig. 4) ;
- ceux dont les signatures ne sont compatibles avec aucun espace de production testé individuellement

41. L'HÉRITIER 2016.

42. LEROY *et al.* 2015b.

43. DIEUDONNÉ-GLAD 1992.

44. LANDES & BORDELOUP 1985 ; BORDELOUP 1995.

45. Arch. dép. Cher, G 1, fol. 664 r°.

46. Le prieuré de Bléron pourrait lui aussi avoir possédé des forges : BORDELOUP 1995 ; LANDES & BORDELOUP 1985 ; CAHIERS D'ARCHÉOLOGIE ET D'HISTOIRE DU BERRY 1987, 60. L'information présente dans cet article ne semble s'appuyer sur aucune source sérieuse. Les ferriers découverts à proximité immédiate de l'abbaye de Bléron au lieu-dit du même nom (commune de Saint-Martin-d'Auxigny [Cher]) ont fait l'objet d'un sondage et trois charbons de bois prélevés en stratigraphie ont été datés du Haut-Empire (datation Archéolabs : datations ETH-43283, ETH-43284 et ETH-43285 dont les dates ¹⁴C calibrées respectives sont 37 cal BC-132 cal AD, 3 cal AD-133 cal AD et 43 cal BC-80 cal AD).

47. DUNIKOWSKI 1987.

48. RIBAUT 1991.

49. L'HÉRITIER *et al.* 2011.

50. L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel R (<https://www.r-project.org/>).

51. Cette approche sur les éléments traces est réalisée après vérification que l'ensemble des objets est issu de la filière directe et qu'aucun d'eux n'a subi de recyclage. Ce dernier point est traité en détail dans une autre contribution au sein du présent ouvrage (M. L'Héritier *et al.*).

52. Cette comparaison est réalisée en considérant la teneur de 14 éléments présents à l'état de traces et dont la composition a été normalisée par rapports de logarithmes. Les éléments considérés sont : Y, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Yb, Hf, Th et U. Le détail de la normalisation en rapport de logarithmes pourra être trouvé dans LEROY *et al.* 2012. Les éléments utilisés pour le calcul du dénominateur de ce rapport de logarithmes sont Y, La, Ce, Sm et Eu.

53. Ils se situent exclusivement dans la première travée nord en partant de l'est, dans le prolongement de l'abside.

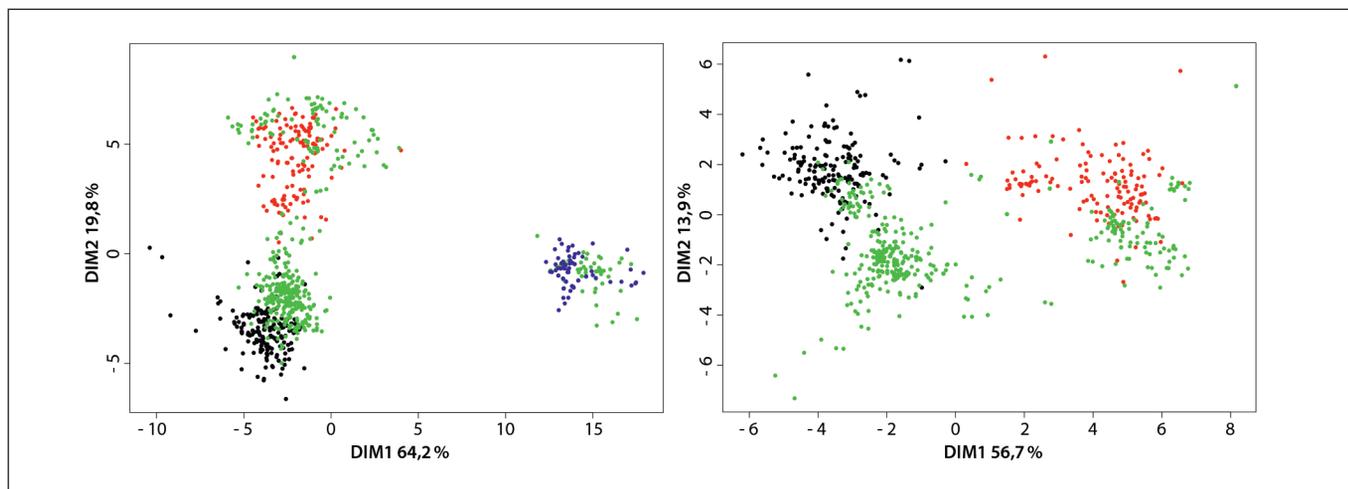


Fig. 3 Résultats de l'analyse linéaire discriminante (ALD) sur les inclusions des éléments du chaînage de la cathédrale de Bourges. Points bleus : maillons de l'absida. Points verts : maillons de la nef. Points noirs : scories d'Allogny. Points rouges : scories de Nozières. Doc. M. L'Héritier et P. Dillmann.

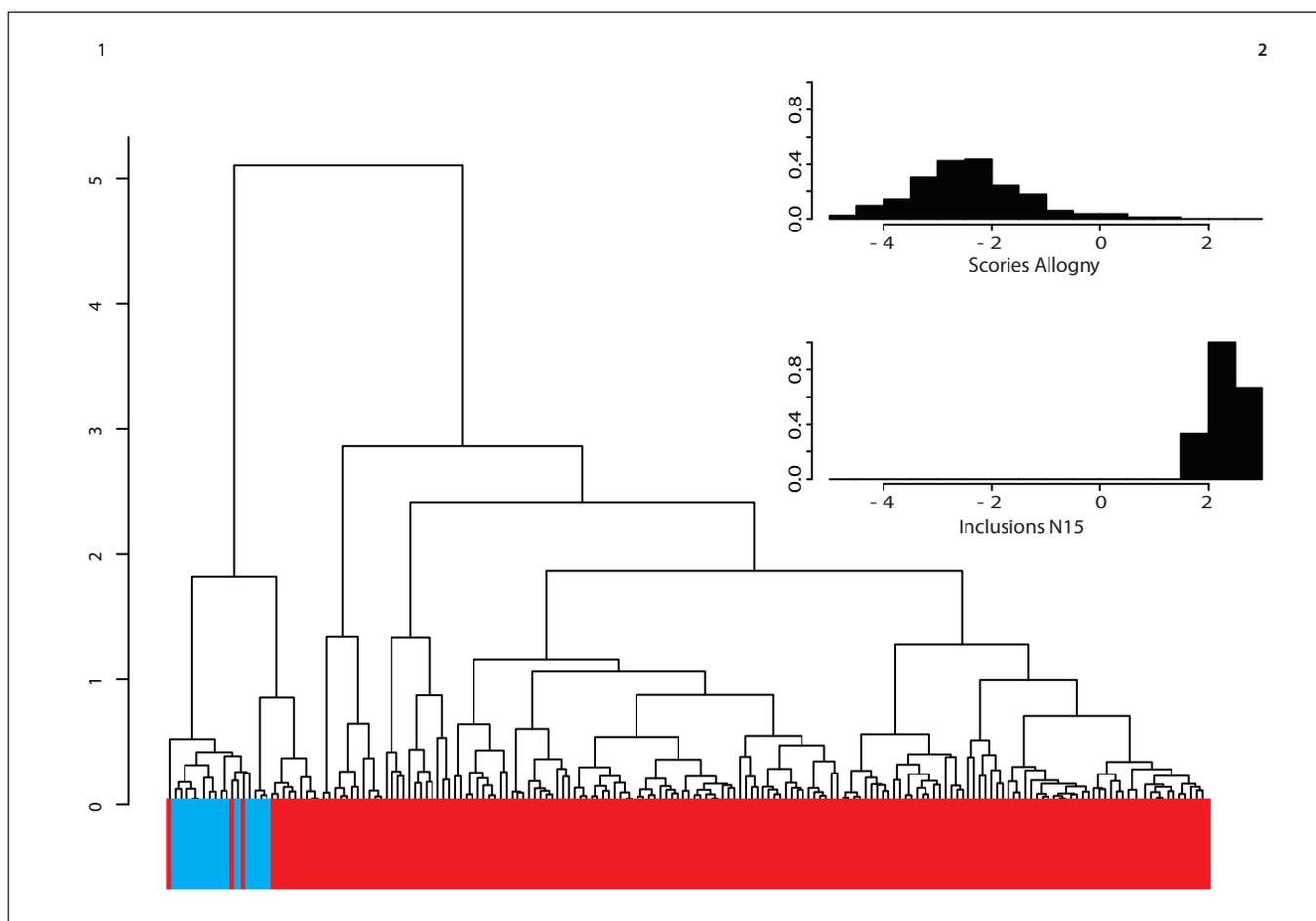


Fig. 4 Échantillon N15: 1) classification ascendante hiérarchique (CAH) sur les inclusions de l'échantillon (bleu) et les scories d'Allogny (rouge); 2) analyse linéaire discriminante (ALD). Doc. M. L'Héritier et P. Dillmann.

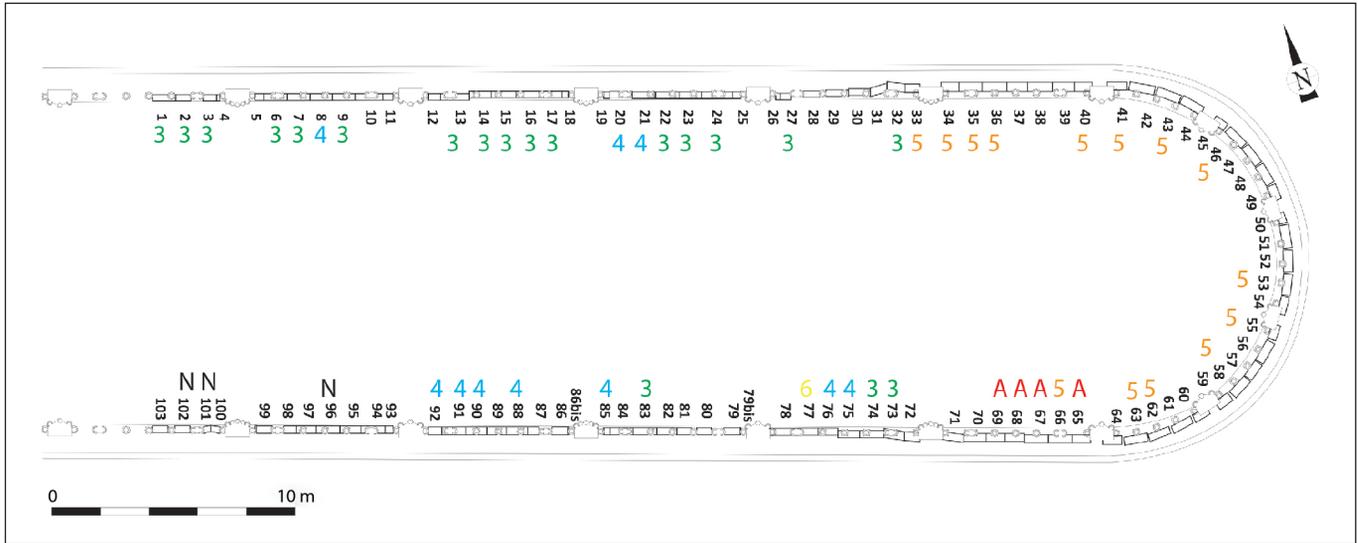


Fig. 5 Numérotation des maillons du chaînage de la cathédrale de Bourges et localisation des différents groupes de provenance des maillons analysés. Doc. M. L'Héritier et P. Dillmann.

tant par les méthodes supervisées que non supervisées et pour lesquels on peut exclure une provenance liée aux espaces testés⁵⁴.

La figure ci-dessus synthétise l'ensemble de la démarche et indique la répartition des maillons dans différents groupes sur le chaînage du triforium : groupe N pour les échantillons compatibles avec les scories de l'ensemble Nozières, groupe A pour ceux compatibles avec Allogny, groupe 3 pour les échantillons de signature proche de celle d'Allogny (non séparables significativement par l'analyse HAC mais séparables par l'analyse ALD), groupe 4 pour des échantillons proches de la signature de Nozières, groupes 5 et 6 pour des échantillons de compositions nettement différentes de ces deux espaces de production (fig. 5). Les analyses par éléments traces de la composition des inclusions du chaînage de la cathédrale de Bourges montrent donc qu'il existe au moins six sources d'approvisionnement parmi lesquelles quatre ont pu être rapprochées d'ensembles de production régionaux dont deux de manière certaine. Ainsi, ces différences de composition montrent la variété des provenances pour le métal du chantier, elles peuvent également être rapprochées du phasage de la mise en place du chaînage mis en évidence par l'analyse archéologique et par l'analyse des plombs⁵⁵. On mesure sur ce chantier la complexité des approvisionnements, faisant appel à des

sources locales mais également à des lots plutôt homogènes, vraisemblablement provenant de sources plus lointaines, comme pour les maillons placés dans l'abside, et recourant même à des éléments issus du recyclage⁵⁶.

Des approches similaires ont été suivies pour différents monuments et permettent aujourd'hui de dresser un premier bilan sur les pratiques d'approvisionnement en métaux ferreux sur les chantiers gothiques. Ainsi, au palais des Papes d'Avignon, sur lequel des quantités importantes de métal renforcent l'ensemble de la structure⁵⁷, les sources écrites indiquent l'existence d'un maître des ferrures seul habilité à acheter et revendre le fer à la chambre apostolique pour le chantier papal. Les données des archives⁵⁸ révèlent l'existence de plusieurs fournisseurs, non identifiés⁵⁹. Les études inclusionnaires sur les tirants du Grand Promenoir, de la galerie du Conclave, des tours des Latrines et de Trouillas confirment la variété des fournitures⁶⁰. Elles révèlent également une origine commune pour les fers de la galerie du Conclave (1360) et de la tour de Trouillas (1347) qui pourrait être le Dauphiné sans que cela soit confirmé de manière définitive. La présence de comptoirs lombards revendant notamment du fer et de l'acier de cette région à Avignon à la période de construction du palais des Papes nous a amenés à comparer la signature chimique des inclusions des métaux du palais des Papes à celle des scories de sites de production des vallées bergamasques.

54. Sous réserve que le nombre d'échantillons définissant l'ensemble de production est représentatif de celui-ci.

55. L'HÉRITIER *et al.* 2016.

56. Pour davantage de détails à ce sujet, se reporter au chapitre de M. L'Héritier sur le recyclage au sein du présent ouvrage.

57. BERNARDI & DILLMANN 2002; BERNARDI & DILLMANN 2007.

58. Études menées par P. Bernardi.

59. BERNARDI & DILLMANN 2005; DILLMANN & BERNARDI 2003.

60. *Ibid.*; LEROY 2010.

Ville	Monuments	Datation	Sources locales (< 20 km)	Sources distantes (distances à vol d'oiseau)
Avignon	Palais des Papes	XIV ^e siècle	?	Comté de Foix ou Couserans (300 km) Lombardie exclue Autres sources inconnues Dauphiné possible
Metz	Cathédrale	XIII ^e siècle	Pays haut ou plateau de Haye	?
Metz	Cathédrale	XV ^e siècle	Pays haut ou plateau de Haye	Abbaye d'Orval (80 km)
Troyes	Cathédrale	Fin XIV ^e - début XVI ^e siècle	Pays d'Othe Pays du Der	Fer d'Espagne Abbaye du Reclus (75 km)
Bourges	Cathédrale	XIII ^e siècle	Environs de Noirlac Forêt d'Allogny	Deux autres sources inconnues ⁶¹
Beauvais	Cathédrale	XIII ^e siècle	Pays de Bray exclu	?
Rouen	Cathédrale	XIII ^e -XV ^e siècle	? Pays de Bray exclu	? Fer d'Espagne
Amiens	Cathédrale	XV ^e siècle	?	Fer d'Espagne ?
Capestang	Collégiale	XIII ^e -XIV ^e siècle	?	Comté de Foix ou Couserans (150 km)

Tabl. 1 Approvisionnement en fer de différents chantiers de monuments médiévaux.

Il apparaît que cette origine doit être exclue. En revanche, il a pu être montré que certains fers destinés à renforcer les corbeaux de la tour des Latrines (construite en 1338) provenaient d'un territoire correspondant au comté de Foix ou au Couserans voisin (actuellement en Ariège), connus pour leur production de fer relativement aciéré (le fer de Foix). Aucune source écrite ne cite la vente ou l'achat de fer de Foix à Avignon, en revanche, ce matériau a été identifié en Provence puisqu'il est mentionné pour la construction de la tour du Lion à Arles⁶². L'emploi de ce fer de Foix, provenant d'une zone géographique située à plus de 300 km à vol d'oiseau malgré la présence de nombreux autres produits disponibles sur le marché avignonnais, se devra d'être expliqué plus avant, une explication possible résidant dans les relations privilégiées de l'entourage du Pape avec cette région de production.

On retrouve cette variété des sources pour la tour de Mutte de la cathédrale de Metz, où les comptes attestent en 1479 que du fer provenait de l'abbaye cistercienne d'Orval⁶³, utilisant un certain type de minerai, le fer fort. *A contrario*, les analyses de la composition des agrafes renforçant la tour montrent une compatibilité pour certaines d'entre elles, à la fois dans les parties datant du XIII^e siècle et dans celles du XV^e siècle, avec la minette de Lorraine⁶⁴ exploitée dans d'autres zones sidérurgiques plus proches,

le Pays haut ou le plateau de Haye. Pour la cathédrale de Troyes, les comptes mettent en évidence une provenance des pays d'Othe et des pays du Der, cependant, il semble que ce soit l'abbaye du Reclus, plus lointaine, qui assure au XV^e siècle l'essentiel des fournitures⁶⁵. En Languedoc, les analyses chimiques réalisées sur quelques fers de renfort de la collégiale Saint-Étienne de Capestang (fin XIII^e-début XIV^e siècle) montrent pour certains une origine liée au comté de Foix ou au Couserans⁶⁶, probablement transitant par Narbonne⁶⁷. À Beauvais, les analyses des fers des arcs boutants et du triforium (XIII^e siècle) ont permis d'exclure une origine liée au pays de Bray pourtant voisin. Il convient également de pointer la mention récurrente dans les comptes de certains monuments, notamment les cathédrales et églises de Rouen, Troyes et Amiens, de l'utilisation de fer d'Espagne, dont on ne saisit pas, à l'heure actuelle, la nature et la provenance exacte. Afin de compléter le tableau, il faut enfin mentionner l'utilisation, parfois non négligeable, du recyclage, détecté à Metz, Bourges, Rouen, Troyes et Auxerre par l'analyse du matériau ou les sources écrites⁶⁸. L'ensemble de ces exemples tirés des chantiers gothiques et résumés dans le tableau ci-dessus illustre bien la complexité des marchés médiévaux qui, pour le choix des matériaux et les stratégies d'approvisionnement, mêlent

61. À l'étude présentée dans cette contribution s'ajoute celle des tirants des combles de bas-côtés.

62. VERNA 2001.

63. Arch. mun. Metz, DD 20, fol. 25 v^o.

64. DISSER 2014; DISSER *et al.* 2014.

65. L'HÉRITIER & DILLMANN 2010; L'HÉRITIER, DILLMANN & BENOIT 2010.

66. LEROY *et al.* 2012.

67. VERNA 2001.

68. Pour plus de détails à ce sujet, on se référera à la contribution sur le sujet au sein du présent ouvrage (M. L'Héritier *et al.*).

considérations techniques mais également, voire surtout, opportunités économiques et politiques (tabl. 1). Ainsi, la part des fers locaux dans l'approvisionnement des chantiers, estimée aux trois quarts par Odette Chapelot à partir de l'exemple du Châtillonnais et des seules sources écrites⁶⁹, peut sans doute être relativisée suivant les contextes régionaux. La proximité géographique n'apparaît, au terme de cette étude, que comme un élément parmi bien d'autres influant sur la circulation et l'approvisionnement des matériaux à l'époque médiévale.

Conclusion

À travers quelques exemples portant sur les chantiers des monuments médiévaux, ce bref bilan de l'usage des méthodologies archéométriques développées récemment révèle leur potentiel d'intégration à une réflexion interdisciplinaire, en histoire des techniques et histoire économique.

69. CHAPELOT 1985.

Elles ont notamment permis de révéler que l'usage des fers de renfort était en relation complexe avec les innovations techniques de la période, indiquant également des provenances diverses, loin de privilégier systématiquement les sources locales.

Nous comptons dans les prochaines années élargir le champ d'application de ces méthodologies à d'autres aspects de la société médiévale, notamment celui de la vie quotidienne. La nature des matériaux des objets du quotidien, les procédés utilisés pour la mise en œuvre des métaux ferreux, l'homogénéité des fournitures et leur évolution dans le temps pourront être examinés sur des lots représentatifs de petits mobiliers. Ces travaux permettront d'éclairer un autre aspect de la métallurgie médiévale que celui lié aux chantiers exceptionnels des monuments gothiques. Dans le même esprit, l'étude d'autres productions métallurgiques, notamment dans le domaine de l'armement avec des objets caractéristiques de la période médiévale comme les armures ou les bombardes, est en cours. La poursuite de ces programmes de recherche permettra de brosser un tableau plus complet de l'ensemble des questions techniques, économiques, politiques et culturelles, liées à la production et aux usages des alliages ferreux tout au long du Moyen Âge.

Bibliographie

- AUMARD S., DILLMANN P. et L'HÉRITIER M. (2011), « Le métal selon l'archéologue et l'archéomètre », in *Saint-Étienne d'Auxerre : la seconde vie d'une cathédrale. 7 ans de recherches pluridisciplinaires et internationales*, S. AUMARD (dir.), Auxerre / Paris, Centre d'études médiévales / Picard, p. 353-376.
- AWTY B. G. (2007), « The Development and Dissemination of the Walloon Method of Ironworking », *Technology and Culture*, vol. XLVIII, n° 4, p. 783-803.
- BELHOSTE J.-F. et LÉON P. (1996), « Naissance d'une sidérurgie moderne aux confins du Berry (fin du XIV^e-XV^e siècles) », *Cahiers d'archéologie et d'histoire du Berry*, hors-série : *Mélanges Jean-Yves Ribault*, p. 45-51.
- BELHOSTE J.-F. et al. (1991), *La métallurgie normande, XII^e-XVII^e siècles : la révolution du haut-fourneau*, Paris, SPADEM.
- BERNARDI P. et DILLMANN P. (2002), « La place du métal dans la construction », in *Monument de l'histoire : construire, reconstruire le palais des Papes, XIV^e-XX^e siècles*, D. VINGTAIN (dir.), Avignon, RMG-Palais des Papes, p. 63-67.
- (2003), « Métal et architecture médiévale : l'exemple du palais des Papes d'Avignon », in *Archeologie : studi in onore di Tiziano Mannoni*, N. CUCUZZA et M. MEDRI (dir.), Bari, Edipuglia, p. 279-282.
- (2005), « Stone Skeleton or Iron Skeleton : the Provision and Use of Metal in the Construction of the Papal Palace at Avignon in the 14th Century », in *De Re Metallica : the Uses of Metal in the Middle Ages*, R. BORK (dir.), Aldershot, Ashgate, p. 297-315.
- (2007), « L'impiego del metallo nel cantiere trecentesco del Palazzo dei Papi di Avignone », in *Arnolfo di Cambio e la sua epoca*, V. F. PARDO (dir.), Rome, Viella, p. 231-240.
- BINDLER R. et al. (2011), « Early Medieval Origins of Iron Mining and Settlement in Central Sweden : Multiproxy Analysis of Sediment and Peat Records from the Norberg Mining District », *Journal of Archaeological Science*, vol. XXXVIII, n° 2, p. 291-300.

- BORDELOUP J.-M. (1995), « Nouvelles observations sur la métallurgie ancienne du fer à Allogny (Cher) », *Bulletin du Groupe de recherches archéologiques et historiques de Sologne*, n° 1, p. 143-158.
- BRAUNS M. *et al.* (2013), « Provenance of Iron Age Iron in Southern Germany: a New Approach », *Journal of Archaeological Science*, vol. XL, n° 2, p. 841-849.
- CAHIERS D'ARCHÉOLOGIE ET D'HISTOIRE DU BERRY (1987), *Cahiers d'archéologie et d'histoire du Berry*, n° 88-89, p. 60.
- CHAPELOT J. (2003), « Le donjon et son enceinte : une résidence royale », *Les dossiers d'archéologie – Vincennes*, n° 289, p. 60-73.
- CHAPELOT O. (1985), « Les ouvriers du métal en Bourgogne à la fin du Moyen Âge : l'exemple du Châtillonnais », in *Pierre et métal dans le bâtiment au Moyen Âge*, O. CHAPELOT et P. BENOIT (dir.), Paris, Éd. de l'École des hautes études en sciences sociales, p. 305-318.
- DIEUDONNÉ-GLAD N. (1992), « La métallurgie du fer autour d'Avaticum (Bourges) dans l'Antiquité », *Revue archéologique du centre de la France*, n° 31, p. 58-74.
- DILLMANN P. (2009), « De Soissons à Beauvais : le fer des cathédrales de Picardie, une approche archéométrique », in *L'homme et la matière : l'emploi du plomb et du fer dans l'architecture gothique*, A. TIMBERT (dir.), Paris, Picard, p. 93-112.
- DILLMANN P. et BELLOT-GURLET L. (dir.) (2014), *Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes*, Paris, Éd. des Archives contemporaines.
- DILLMANN P. et BERNARDI P. (2003), « Premiers résultats métallographiques sur les tirants de fer du palais des Papes d'Avignon : éléments de réflexion sur la qualité et la provenance des matériaux ferreux utilisés dans la construction monumentale au Moyen Âge », in *Au-delà de l'écrit : les hommes et leurs vécus matériels au Moyen Âge à la lumière des sciences et des techniques. Nouvelles perspectives*, J.-P. SOSSON et I. PAQUAY (dir.), Turnhout, Brepols (Typologie des sources du Moyen Âge occidental. Hors-série), p. 241-279.
- DILLMANN P. et L'HÉRITIER M. (2007), « Slag Inclusion Analyses for Studying Ferrous Alloys Employed in French Medieval Buildings: Supply of Materials and Diffusion of Smelting Processes », *Journal of Archaeological Science*, vol. XXXIV, n° 11, p. 1810-1823.
- (2009), « Récupération et emploi du fer pour la construction des monuments de la période gothique », in *Il reimpiego in architettura : recupero, trasformazione, uso*, J.-F. BERNARD *et al.* (dir.), Rome, École française de Rome, p. 157-176.
- DILLMANN P., PEREZ L. et VERNA C. (2011), « Les aciers avant Bessemer », in *L'acier en Europe avant Bessemer*, P. DILLMANN, L. PEREZ et C. VERNA (dir.), Paris/Toulouse, CNRS/Université Toulouse-Le Mirail, p. 7-69.
- DILLMANN P. *et al.* (2012), « Understanding the Walloon Method of Iron Refining: Archeological and Archeometric Experiments », *Journal of Historical Metallurgy*, vol. XLVI, n° 1, p. 19-31.
- (2015), « Dernières avancées autour des études sur la production, la circulation et la datation des métaux ferreux archéologiques », *Les nouvelles de l'archéologie*, n° 138, p. 28-34.
- DISSER A. (2014), *Production et circulation du fer en Lorraine (VI^e s. av. J.-C.-XV^e s. apr. J.-C.)*, thèse d'archéologie et d'archéométrie, université de technologie de Belfort-Montbéliard, 2 vol., 1 038 p. (dactyl.).
- DISSER A. *et al.* (2014), « Iron Reinforcements, in Beauvais and Metz Cathedrals: from Bloomery or Finery? The Use of Logistic Regression for Differentiating Smelting Processes », *Journal of Archaeological Science*, vol. XLII, n° 1, p. 315-333.
- DOMERGUE C. (1993), *Un centre sidérurgique romain de la Montagne Noire : le Domaine des Forges (Les Martyrs, Aube)*, Paris, CNRS Éditions.
- DUNIKOWSKI C. (1987), « Étude d'un complexe métallurgique à Farges-Allichamps (Centre) », *Revue archéologique du centre de la France*, n° 26, p. 85-86.
- FLUZIN P. (1993), « Interprétation des études métallographiques des scories : recherche d'éléments discriminatoires », in *La sidérurgie de l'est de la France dans son contexte européen : archéologie et archéométrie*, M. MANGIN (dir.), Besançon, Les Belles Lettres, p. 21-24.
- FLUZIN P., PLOQUIN A. et SERNEELS V. (2000), « Archéométrie des déchets de production sidérurgique : moyens et méthodes d'identification des différents éléments de la chaîne opératoire directe », *Gallia*, n° 57, p. 1-158.
- GILLARD A. (1971), *L'industrie du fer dans les comtés de Namur et de l'Entre-Sambre-et-Meuse de 1345 à 1600*, Bruxelles, Pro Civitate.

- GUILLOT I. *et al.* (1991), « Études paléométallurgiques comparatives d'outils miniers du XV^e et du XVI^e siècle », in *Symposion Archäometallurgie von Kupfer und Eisen im Westeuropa*, Mayence, Römisch-Germanisches Zentralmuseum, p. 641-655.
- HORIKOSHI K. (2008), *L'industrie du fer en Lorraine, XII^e-XVII^e siècles*, Langres, Guéniot.
- JOCKENHÖVEL A. (2013), *Mittelalterliche Eisengewinnung im Märkischen Sauerland: archäometallurgische Untersuchungen zu den Anfängen der Hochofentechnologie in Europa*, Rahden, Leidorf.
- LANDES C. et BORDELOUP J.-M. (1985), « Recherches récentes sur la forêt d'Allogny (Cher) », *Bulletin du Groupe de recherches archéologiques et historiques de Sologne*, n° 7, p. 41-52.
- LEFEBVRE É. et L'HÉRITIER M. (2014), « De l'emploi du fer dans la structure de la cathédrale de Chartres : approche qualitative et quantitative », in *Chartres: construire et restaurer la cathédrale (XIII^e-XXI^e s.)*, A. TIMBERT (dir.), Villeneuve-d'Ascq, Presses universitaires du Septentrion, p. 287-306.
- LEROY M. (1997), *La sidérurgie en Lorraine avant le haut-fourneau: l'utilisation du minerai de fer oolithique en réduction directe*, Paris, CNRS Éditions.
- (1998), « Autour de la "minette" : la perdurance de la production de fer en bas-fourneau en Lorraine à la fin du Moyen Âge », in *L'innovation technique au Moyen Âge*, actes du VI^e congrès international d'archéologie médiévale, P. BECK (dir.), Paris, Errance, p. 145-150.
- LEROY S. (2010), *Circulation au Moyen Âge des matériaux ferreux issus des Pyrénées ariégeoises et de la Lombardie. Apport du couplage des analyses en éléments traces et multivariées*, université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2 vol., 390 p. (dactyl.).
- LEROY S. *et al.* (2012), « The Medieval Iron Market in Ariège (France) : Multidisciplinary Analytical Approach and Multivariate Analyses », *Journal of Archaeological Science*, vol. XXXIX, n° 4, p. 1080-1093.
- (2013), « Datation radiocarbone des alliages ferreux anciens », in *Actes du colloque « Sciences des matériaux du patrimoine culturel »*, Paris, 20 et 21 novembre 2012, Paris, Ministère de la Culture et de la Communication, p. 57-63.
- (2014), « Provenance et circulation des alliages ferreux », in DILLMANN & BELLOT-GURLET 2014, p. 79-108.
- (2015a), « First Direct Dating for the Construction and Modification of the Baphuon Temple Mountain in Angkor, Cambodia », *PLoS ONE*, n° 10, p. e0141052.
- (2015b), « Consolidation or Initial Design ? Radiocarbon Dating of Ancient Iron Alloys Sheds Light on the Reinforcements of French Gothic Cathedrals », *Journal of Archaeological Science*, n° 53, p. 190-201.
- L'HÉRITIER M. (2004), « L'utilisation du fer à la cathédrale de Rouen à l'époque médiévale », *Haute-Normandie archéologique*, n° 9, p. 69-78.
- (2009), « L'utilisation du fer dans l'architecture gothique : approche méthodologique à travers les villes de Rouen et Troyes », in *L'homme et la matière : l'emploi du plomb et du fer dans l'architecture gothique*, A. TIMBERT (dir.), Paris, Picard, p. 61-74.
- (2012), « Réflexion sur les usages du fer à la cathédrale de Coutances et dans l'architecture gothique normande », in *La cathédrale de Coutances : art et histoire*, P. BOUET, G. DESIRÉ DIT GOSSET et F. LATY (dir.), Bayeux, Orep, p. 39-56.
- (2015), « Fer et plomb sur le chantier », in *Saint-Denis : dans l'éternité des rois et des reines de France*, P. DELANNOY (dir.), Strasbourg, La Nuée bleue, p. 96-98.
- L'HÉRITIER M. (2016), « Les armatures de fer de la cathédrale de Bourges : nouvelles données, nouvelles lectures », *Bulletin monumental*, vol. CLXXIV, n° 4, p. 447-465.
- L'HÉRITIER M. et DILLMANN P. (2010), « L'approvisionnement en fer des chantiers de construction médiévaux : coût, quantités et qualité. L'exemple des églises de la période gothique », in *Édifice et artifice : histoires constructives. Recueil de textes issus du I^{er} congrès francophone d'histoire de la construction*, R. CARVAIS *et al.* (dir.), Paris, Picard, p. 457-466.
- (2011), « Fer ou acier ? Caractérisation des alliages ferreux utilisés dans la construction des églises gothiques au Moyen Âge et à la période moderne. L'exemple de Troyes et de Rouen », in *L'acier en Europe avant Bessemer*, P. DILLMANN, L. PEREZ et C. VERNA (dir.), Paris / Toulouse, CNRS / Université Toulouse-Le Mirail, p. 263-284.
- L'HÉRITIER M., DILLMANN P. et BENOIT P. (2005), « Premiers résultats métallographiques sur les fers de construction de la cathédrale Notre-Dame de Rouen », in *Les arts du feu en Normandie*, actes du XXXIX^e congrès organisé par la Fédération des sociétés historiques et archéologiques de Normandie, J.-P. HERVIEU, G. DESIRÉ DIT GOSSET et É. BARRÉ (dir.), Caen, Annales de Normandie, p. 287-314.

- (2010), «Iron in the Building of Gothic Churches: its Role, Origins and Production Using Evidence from Rouen and Troyes», *Historical Metallurgy*, vol. XLIV, n° 1, p. 21-35.
- L'HÉRITIER M. *et al.* (2011), «From the Bloomery Furnace to the Building Yard: Iron Supply for the Construction of the Cathedral of Bourges», *Metalla Sonderheft*, n° 4, p. 107-108.
- (2014), «Étude archéologique et archéométrique des éléments métalliques autour des *oculi* des baies hautes du chœur», in *Chartres: construire et restaurer la cathédrale (XIII^e-XXI^e s.)*, A. TIMBERT (dir.), Villeneuve-d'Ascq, Presses universitaires du Septentrion, p. 307-320.
- (2016), «Lead it Be! Identifying the Construction Phases of Gothic Cathedrals Using Lead Analysis by LA-ICP-MS», *Journal of Archaeological Science: Reports*, n° 6, p. 252-265.
- MAGGI C. *et al.* (2012), «Utilisation et technique de production du fer et du bois dans les charpentes de comble mosanes: premiers jalons d'une évolution du XII^e au XVIII^e siècle», *ArcheoSciences: revue d'archéométrie*, n° 36, p. 95-115.
- RIBAULT J.-Y. (1991), «L'abbaye cistercienne de Noirlac et la métallurgie du fer au XIII^e siècle», *Lettre de Noirlac* [1991], p. 14-17.
- ROUILLARD J. (2003), *L'homme et la rivière: histoire du bassin de la Vienne au Moyen Âge (XII^e-XVI^e siècles)*, thèse, université Paris I, 5 vol., 1199 p. (dactyl.).
- TEREYGEOL F. (2013), *Comprendre les savoir-faire métallurgiques antiques et médiévaux*, Paris, Errance.
- VERNA C. (2001), *Le temps des moulins: fer, technique et société dans les Pyrénées centrales (XIII^e-XVI^e siècles)*, Paris, Publications de la Sorbonne.
- VERNA C. et BENOIT P. (1990), «La sidérurgie de Clairvaux au Moyen Âge (XII^e-XV^e siècles)», in *Histoire de Clairvaux*, actes du colloque de Bar-sur-Aube/ Clairvaux (22 et 23 juin 1990), Bar-sur-Aube, Association Renaissance de l'abbaye de Clairvaux, p. 85-111.

