



HAL
open science

La Mutte, le fer et la minette. Recherches sur l'origine des renforts métalliques utilisés dans la construction de la tour de Mutte de la cathédrale Saint-Étienne de Metz

Alexandre Disser, Marc Leroy, Philippe Dillmann, Maxime L'Héritier, Paul Merluzzo

► To cite this version:

Alexandre Disser, Marc Leroy, Philippe Dillmann, Maxime L'Héritier, Paul Merluzzo. La Mutte, le fer et la minette. Recherches sur l'origine des renforts métalliques utilisés dans la construction de la tour de Mutte de la cathédrale Saint-Étienne de Metz. *Annales de l'Est*, 2019. hal-03109465

HAL Id: hal-03109465

<https://hal.science/hal-03109465>

Submitted on 7 Jan 2022

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.

La Mutte, le fer et la minette.

Recherches sur l'origine des renforts métalliques utilisés dans la construction de la tour de Mutte de la cathédrale Saint-Etienne de Metz.

Disser Alexandre (1), Leroy Marc (2), Dillmann Philippe (1), L'Héritier Maxime (3), Merluzzo Paul (2)

(1) LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA, CNRS, Université de Paris-Saclay CEA-Saclay, France

(2) LMC-IRAMAT, UMR 5060, CNRS, LAM-Musée de l'Histoire du fer, Jarville, France

(3) Université Paris 8, EA 1571, Saint-Denis, France

Introduction : du fer dans les cathédrales

L'utilisation du fer dans la construction des grands édifices religieux de style gothique, longtemps minimisée, voire ignorée, n'a été remise en lumière qu'à la faveur des grands chantiers de restauration dans la seconde moitié du XX^e siècle, ainsi que, parallèlement, par le dépouillement et l'étude des archives comptables des chantiers médiévaux¹. Les études historiques et archéologiques qui se sont multipliées sur de nombreux édifices civils ou religieux², ont révélé que le fer était présent partout : dans le chaînage des assises de pierres (tirants) et le scellement des blocs (crampons, agrafes) pour assurer la solidité de la construction, dans le scellement des éléments de décoration (statues, pinacles), dans la mise en place et la tenue des vitraux (vergettes et barlotières)... La cohérence du positionnement de ces éléments dans la structure architecturale, mais aussi les résultats apportés par des études archéométallurgiques portant sur la nature de ces fers, ont permis de s'assurer qu'une grande partie d'entre eux ont été installés au cours de la construction et font donc partie de la conception originelle du monument³. D'après les estimations réalisées sur les bâtiments et l'interprétation des données fournies par les archives comptables des XIV^e et XV^e siècles, la masse de fer utilisée se compterait en dizaines de tonnes par édifice, au moins⁴. Ainsi, on peut désormais considérer que le développement de l'architecture de style gothique, avec ses formes élancées et ajourées, ses larges baies vitrées, est fortement tributaire de l'utilisation du fer et de son rôle architectural et technique.

¹ Chapelot, Benoit 1985, Erlande-Brandenburg 1996, Taupin 1996.

² Ces travaux sont présentés dans Dillmann, L'Héritier 2016 (voir la bibliographie correspondante dans la note 57).

³ L'Héritier *et al.* 2005, L'Héritier *et al.* 2007, L'Héritier, Dillmann 2011, Leroy S. *et al.* 2015.

⁴ L'Héritier *et al.* 2007.

La cathédrale Saint-Etienne de Metz⁵, qui possède l'une des plus grandes surfaces vitrées (6 500 m²) et de très grandes verrières, a probablement aussi bénéficié de cet apport technique. L'emploi de fer est, en effet, mentionné dans les comptes de construction de la flèche de la tour de Mutte, à la fin du XV^e siècle, qui donnent le chiffre de plus de 50 000 livres de fer utilisées, soit plus d'une vingtaine de tonnes⁶. Le récent chantier de restauration de la tour, réalisé entre 2009 et 2015 sous la conduite de l'architecte en chef des monuments historiques et sous la maîtrise d'ouvrage du Ministère de la Culture et de la Communication, a été l'occasion d'engager, pour la première fois sur un édifice lorrain (et l'un des plus prestigieux pour l'époque), des recherches sur la nature, la datation et l'origine des nombreux renforts métalliques ferreux que l'on peut observer dans les parties supérieures, la salle de la cloche et la flèche⁷.

Mais au delà de l'identification des pièces en fer installées à l'époque médiévale, cette étude permet également d'aborder des problématiques essentielles concernant l'histoire de la sidérurgie lorraine et ses développements techniques : ces fers proviennent-ils d'une source locale ? En d'autres termes, les constructeurs se sont-ils fournis auprès d'ateliers régionaux qui produisaient le fer à partir de l'exploitation des minerais locaux, comme la minette lorraine ou le minerai de fer fort, utilisation mise en lumière par les sources historiques⁸ et démontrée pour la minette par les recherches archéologiques récentes⁹ ? De plus, les cathédrales gothiques, possédant un fort caractère symbolique et ostentatoire, et concentrant de ce fait un haut niveau de savoir-faire technique, constituent un important vecteur potentiel de la diffusion des innovations techniques. Or la fin du Moyen Age est un moment charnière dans l'histoire de la sidérurgie européenne, l'apparition du procédé indirect supplantant progressivement le procédé direct utilisé jusqu'alors¹⁰. L'étude des fers des cathédrales participe ainsi à poser les jalons de ce changement¹¹.

⁵ Afin d'obtenir des informations d'ordre général sur l'édifice, le lecteur pourra se référer aux ouvrages suivants : Jean-Christophe Lagleize dir.(2019) – *Metz* (coll. La grâce d'une cathédrale), Ed. Nuée Bleue ; Pierre-Edouard Wagner (2015) – *La cathédrale Saint-Etienne de Metz* (coll. Cathédrales de France), Editions du Patrimoine CMN.

⁶ Jacob 1864.

⁷ Travaux conduits par une équipe du Laboratoire d'Archéomatériaux et Prévision de l'Altération (LAPA : UMR 5060-IRAMAT et UMR 3685-NIMBE), en partie dans le cadre d'une thèse de doctorat soutenue à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (Disser 2014, Disser *et al.* 2014, Disser *et al.* 2016).

⁸ Horikoshi 2007.

⁹ Leroy M. *et al.* 2015 et *infra* 3.1.

¹⁰ Le procédé direct est le système de production du fer à partir de la réduction du minerai, dans lequel le fer est produit à l'état solide et ne subit pas de fusion ; seule la gangue du minerai fond pour donner un liquide qui se solidifie sous la forme de scorie ; les températures de fonctionnement des fourneaux (ou bas fourneaux) restent donc en deçà de la température de fusion du fer (1550°C). Dans le procédé indirect, le fer est obtenu à l'état liquide sous forme d'un alliage fer-carbone : la fonte, qui est coulée hors du fourneau (ou haut fourneau) et peut-être moulée ; mais pour la production de fer et d'acier, elle devra être affinée dans des foyers de décarburation.

¹¹ L'Héritier *et al.* 2010, Dillmann, L'Héritier 2016.

1. Des tonnes de fer utilisées dans la construction de la tour de Mutte

La tour dite de Mutte flanque le côté sud de l'édifice. Sa base, jusqu'à la hauteur des voûtes, est construite en même temps que la nef au cours du XIII^e siècle¹². Elle est couronnée d'un beffroi en bois, qui accueille au début du XV^e siècle la cloche municipale (la Mutte). Suite à un incendie qui le détruit en 1468, un clocher en pierre de style flamboyant est édifié. Le chantier, relativement bien documenté, s'est déroulé de 1478 à 1483¹³. L'incendie de 1877, qui a fragilisé la tour, a nécessité une importante campagne de restauration et en 1909 la flèche qui la couronne est entièrement reconstruite.

1.1. Les achats de fer dans les comptes de construction de la tour de Mutte

Les comptes de la ville de Metz font état des dépenses pour édifier le dernier étage et la flèche du « clochier de Meutte » entre 1478 et 1483. Si les mentions enregistrées ont avant tout une vocation financière, elles permettent néanmoins d'appréhender avec précision l'organisation de l'approvisionnement en fer par la cité.

La ville de Metz s'occupe d'un côté de l'achat du fer et rémunère de l'autre deux forgerons pour « la fasson » du « fer que la citeit leur avoit delivrez »¹⁴. Ces forgerons, Piersson de Chambre et Julien, tous deux qualifiés de serruriers¹⁵, sont payés à la livre de fer ouvrée, 2 d. ob. la livre, puis 2 d. à partir du mois d'octobre 1480 jusqu'à la fin du chantier. La seule exception notable à ce tableau concerne le compte de la « grosse cloche », inséré à la fin de la 2^e commission pour l'année 1479-1480, où la cité paye cette fois les forgerons (alors appelés maréchaux) et leurs valets à la journée de travail, respectivement 3 s. et 20 d., sans plus de détail. On y retrouve Piersson et Julien, ainsi qu'un autre forgeron nommé Mengin, mais en général, maréchaux et valets sont simplement dénombrés jour par jour et ne sont alors pas nommés. Le fer est alors mené « sur saint hilaire »¹⁶, là où la cloche est fondue. Jusqu'à quatre maréchaux et quatre valets y travaillent chaque jour pour un total de 220 journées de « maréchaux » et 216 de « valets » entre août 1479 et avril 1480. Une fois la cloche fondue, le fourneau est détruit et le fer et les outils ayant servi à sa fabrication semblent récupérés et transportés au palais¹⁷, lieu habituel de stockage en face de la cathédrale de Metz.

Si la dissociation entre l'achat du fer et le paiement des forgerons est une procédure habituelle à la fin du Moyen Age, la gestion de l'approvisionnement semble particulière à la cité de Metz. Alors qu'à Troyes par exemple, la ville comme le chapitre ou les différentes fabriques s'approvisionnent en fer presque exclusivement auprès de marchands urbains¹⁸, la cité de Metz s'occupe en revanche elle-même des achats de fer non ouvré à l'extérieur de la

¹² Villes 2004.

¹³ Jacob 1864.

¹⁴ Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 76r.

¹⁵ Et plus rarement de maréchaux ou de fèvres.

¹⁶ Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 37r, 42 r.

¹⁷ Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 47r.

¹⁸ Collet 2010, p. 445-448 ; L'Héritier 2007, p. 401-403. Les quantités de fer en jeu sont du même ordre de grandeur.

ville¹⁹. Ce fer est à plusieurs reprises qualifié de « frant » ou « tout frant » et parfois « tout frant en achat »²⁰, indiquant l'absence de taxes pesant sur la marchandise. La ville s'acquitte d'ailleurs à chaque mention d'achat de fer, d'un paiement « pour la part du fourain pour la malletoste, tonnieu et pezaige »²¹ et parfois d'un paiement du transport « pour monner au pallaix » ou chez le serrurier²². Ces dépenses supplémentaires sont de l'ordre de quelques sous à une livre au maximum, suivant les quantités de fer achetées. On ignore toutefois où la ville s'approvisionne, la seule mention de « messagers envoyés à la forge d'Orval »²³ à un creux de l'approvisionnement de l'été 1479 (figure 1), juste avant la facture de la « grosse cloche », ne permettant pas de conclure s'il s'agit d'une source régulière ou au contraire d'une source exceptionnelle convoquée pour l'occasion. Le prix du fer acheté par la ville est ainsi variable, de 12 s. à 19 s. le cent, à l'exception de deux fournitures de pièces de dimensions particulières, l'une à un marchand « pour 4 piece de fer pezant 248 lb. pour ferrer lez aixis pour monner meutte »²⁴ à 4 d. la livre, et l'autre pour « une grosse piece de fer pour pandre la cloche de meutte pezant 535 lb. »²⁵ à 8 francs le cent²⁶. Un tel circuit d'approvisionnement révèle l'accès facilité de la ville au marché du fer non ouvré, témoignage probable du contrôle exercé sur la production par les bourgeois de la ville. Cela lui permet d'abaisser ses coûts, et très certainement d'exercer à cette occasion une pression sur les serruriers urbains, qu'elle approvisionne elle-même en fer pour le chantier de la Mutte. Sans jouir d'un monopole, la situation privilégiée de la ville devait lui permettre de négocier plus facilement les prix de leur travail, notamment en septembre 1480, où il passe de 2 d. ob. à 2 d. la livre, à une période qui correspond précisément à l'augmentation de la commande en fer de la part de la ville et à une légère augmentation du coût du fer non ouvré, alors plus régulièrement payé 19 s. le cent. Au total, maltôte, pesage et tonlieu compris, le fer forgé lui revient entre 4 et 5 d. la livre, une somme bien en deçà des 6 à 7 d. minimum observés en d'autres lieux à la même période²⁷.

Mis à part les pièces exceptionnelles citées plus haut, les dimensions des fers achetés ne sont que rarement mentionnées dans les comptes. Deux mentions indiquent d'une part qu'une livraison de 1115 lb. de fer a été livrée « en bande »²⁸ et que 27 bandes transportées du Palais au poids de Portemuzelle puis chez le forgeron pesaient 525 livres, soit en moyenne 9 kg pièce, dimensions qui semblent habituelles pour la circulation de ce type de matières

¹⁹ A l'exception des clous et autres petits éléments de quincaillerie et quelques rares pièces de fer qui sont achetés à des marchands.

²⁰ Par exemple, Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 5r, 17r.

²¹ Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 55v. Les pièces sont pesées au « poids de porte Muzelle ».

²² *Et pour le monner partie ou pallaix et partie ou chief jullien le feivre* (Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, 93v). Les autres matériaux, comme le plomb, sont pour leur part bien achetés à des marchands et si la mention d'un pesage et du transport jusqu'au poids et au palais est parfois bien mentionnée, la ville ne paye jamais les taxes (tonlieu ou maltôte) en sus (Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 73v et 81v).

²³ Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 25 v°.

²⁴ Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 43v. Ces pièces de 30 kg en moyenne reviennent à 33 s. 4 d. le cent, deux fois plus qu'à l'accoutumée.

²⁵ Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, 91v.

²⁶ Environ 95 sous le cent d'après la somme enregistrée dans les comptes, soit plus de cinq fois le prix habituel du fer ! La taille exceptionnelle de la pièce en question (plus de 260 kg !) est certainement la raison d'un tel prix.

²⁷ Lardin 1998, p. 270-272 ; Collet 2010, p. 188., L'Héritier 2007, p. 766.

²⁸ Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 90r.

premières²⁹. Les dimensions des ferrures produites par les forgerons, semble-t-il sur commande du maître charpentier et maître de l'ouvrage Hannes Cocque³⁰, ne sont pas détaillées davantage. Mais on sait en revanche la destination des pièces qu'ils fabriquent, qualifiées à plusieurs reprises de « crampons », « bairlez », « crochets » et « autres ouvrages » pour les maçons et parfois pour les charpentiers³¹. Les mentions de la dernière commission évoquent également le fait de « pandre et ataichier lez feneistres » « du clochiez de meute en paire en crampons »³².

Au total, ce sont plus de 51.000 livres de fer que la ville achète pour les différents ouvrages, dont 48.000 environ pour le gros œuvre (figure 1), et dont plus de 41.000 furent forgées par les seuls Julien et Piersson en ces 5 années. Se pose ainsi la question de la gestion de l'approvisionnement de telles quantités, en particulier lors des pics de consommation entre août 1480 et septembre 1481, où plus de 30.000 livres sont achetées sur cette seule année.

Figure 1 : Quantités de fer achetées par la ville de Metz pour le chantier de la tour de Mutte entre janvier 1478 et décembre 1482.

1.2. Les renforts métalliques dans la tour de Mutte : observations réalisées en 2010-2011-2012

La récente campagne de restauration de la tour de Mutte a permis d'accéder aux fers architecturaux disposés à divers niveaux de l'édifice. Plusieurs campagnes de relevés et de prélèvements ont été réalisées entre 2010 et 2012. Plusieurs centaines d'éléments, constitués d'alliages ferreux ou d'alliages base cuivre, mis en œuvre sur les parements externes de la tour, ont été repérés. Plusieurs dizaines de renforts étaient également visibles sur les parements internes et la voûte de la salle des cloches. La majorité des agrafes et autres tirants engagés dans la maçonnerie présentaient encore tout ou partie de leur scellement en plomb. La position de chaque agrafe sur l'édifice a été reportée sur un plan en déroulé réalisé à partir des relevés établis pour chaque face par le cabinet d'architecte 2BDM. De manière générale, la disposition des renforts sur les parements externes ne reflète pas d'organisation particulière. Cent quarante-six individus, soit plus de 40% des renforts observés, ont par exemple été appliqués sur la seule façade nord. Cet état de fait est certainement lié à l'histoire *post constructionem* de l'édifice, ce dernier ayant subi plusieurs dégradations, dont un incendie de grande ampleur en 1877. La fragilisation de la structure maçonnée a certainement motivé la mise en place de nombreux renforts. En revanche, des schémas de disposition réguliers sont observables en plusieurs autres endroits, notamment sur les façades est et sud. Ces deux constats amènent à proposer un scénario relatif à la mise en œuvre des crampons. Certains ont été intégrés de manière planifiée et régulière à la maçonnerie de l'édifice à l'occasion de sa construction (*supra 1.1.*). D'autres ont été disposés au cours des siècles suivants pour répondre à des besoins de consolidation ponctuels. L'intérieur de l'édifice, et notamment la chambre des cloches, suggère un scénario similaire. Les renforts sont disposés sur la voûte selon un schéma très régulier, ce qui n'est pas le cas des crampons sur les parements intérieurs de la tour.

²⁹ Pagès, L'Héritier 2015.

³⁰ Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 94v.

³¹ Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 29r, 31v, 50v, 58r.

³² Arch. Mun. Metz, DD 20 liasse 2, fol. 94v.

Au total, 426 éléments ferreux ont été prélevés (figure 2). L'importance du corpus réuni, ainsi que la mise en évidence de la mise en œuvre tardive de certains renforts, a nécessité d'opérer une sélection parmi les objets prélevés en vue de réaliser une étude basée sur l'examen des microstructures du métal et la caractérisation chimique des inclusions. L'étude s'est donc concentrée sur les éléments ferreux faisant partie de schémas de disposition réguliers, susceptibles par conséquent d'avoir été mis en œuvre lors de la construction de la tour.

Figure 2 : Emplacement des crampons prélevés sur les façades externes de la tour de Mutte.

1.3. Les caractéristiques morphologiques et techniques des crampons de scellement

Chaque renfort métallique a fait l'objet de mesures et d'observations. Une grille d'examen basée sur les dimensions du corps et des tenons, ainsi que sur la morphologie de ces derniers, a été établie. De manière générale, le corpus prélevé montre une importante diversité, ce qui conforte l'hypothèse d'interventions survenues à des époques différentes.

1.3.1. Morphologies et dimensions

Les caractéristiques métrologiques relevées pour chaque individu sont la longueur du corps du crampon, les dimensions de la section de la pièce de métal, ainsi que la longueur des tenons. Les points de mesure adoptés à l'occasion de l'étude morphologique du corpus sont présentés par la figure 3. Les observations métr- et morphologiques ont été réalisées sur 343 individus.

Figure 3 : Mesures prises pour caractériser les dimensions des éléments de renfort ferreux.

Longueur du fer plat

La longueur des crampons varie de 15 à 130 centimètres (figure 4). Toutefois, plus de 90% des individus présentent une longueur comprise entre 20 et 60 centimètres. Un peu plus de la moitié des fers mesurés sont caractérisés par une longueur de 30 à 40 centimètres, pour une valeur modale de 34 centimètres. La distribution des valeurs présente un caractère multimodal, avec notamment un pic pour les valeurs comprises entre 46 et 50 cm (26 individus, soit 8% du corpus mesuré). La forte représentation de la classe modale suggère que, malgré la variabilité importante de la longueur des crampons, un module ait été privilégié, à une époque, dans l'emploi d'agrafes métalliques sur le bâtiment.

Forme de la section

La distribution du rapport d'aplatissement de la section (rapport de la largeur sur l'épaisseur du corps des crampons) des agrafes est quand à elle plus homogène (figure 4). Un dixième des crampons présentent une section carrée. L'indice d'aplatissement est compris entre 1 et 2 dans plus de trois cas sur quatre. La majorité des agrafes présentent ainsi une section relativement trapue. Six individus se caractérisent par un rapport inférieur à 1 ; ils sont plus épais que larges.

Masse des crampons

La masse des crampons se distribue elle aussi de manière quasi-normale, avec pour intervalle modal une masse comprise entre 1000 et 1500 grammes. Près de cinquante pourcents des individus pèsent entre 1 et 2 kilogrammes (figure 4).

Figure 4 : Distributions des longueur, masse et rapport d'aplatissement des crampons prélevés.

Les principales caractéristiques métrologiques décrites suggèrent que le corpus présente une tendance majeure, caractérisée par des éléments dont la longueur est globalement comprise entre trente et quarante centimètres (171 individus, soit 52,5% du corpus mesuré), pesant entre un et deux kilogrammes (159 individus, soit 48,5%), et formés d'un corps métallique relativement trapu, forme illustrée par un indice d'aplatissement compris entre 1 et 2 (244 individus, soit 74,3%). Les valeurs de masse et de facteur d'aplatissement des renforts adoptent une distribution quasi-normale, de sorte qu'il s'avère impossible de distinguer de quelconques groupes morphologiques par le biais de ce critère.

Nous avons cherché à déterminer si les dimensions des agrafes pouvaient être associées à des ensembles de disposition d'éléments de renfort sur le bâtiment. Dans la très grande majorité des cas, les schémas de disposition apparaissant cohérents sont constitués de renforts de dimensions variables. Les critères métrologiques ne peuvent donc pas être utilisés seuls comme témoins d'une phase de mise en place particulière.

1.3.2. La morphologie des tenons

Si les agrafes apparaissent globalement similaires d'un point de vue morphologique, un examen plus détaillé de ces dernières permet de distinguer des variantes révélant des techniques de mise en forme différentes, notamment pour les pattes.

Dans la grande majorité des cas (plus de 95% du corpus étudié), les tenons sont formés par repli à 90° des deux extrémités de la pièce de métal mise en forme. Seuls trois crampons se distinguent par le fait que seule une des extrémités a été repliée. Ceci tiendrait à des raisons fonctionnelles, puisque ces agrafes joignent deux parements perpendiculaires.

Douze individus montrent des tenons torsadés, obtenus par un aplatissement des extrémités du métal suivi du repli des deux angles du tenon. Il est intéressant de noter que sept de ces éléments ont été disposés sur la corniche de l'entablement soutenant la terrasse de la tour, sur les façades orientale et occidentale. Trois autres individus de ce type ont été disposés sur le gable de la baie nord de la salle de la cloche (figure 5). La conjonction d'une particularité morphologique et d'une mise en œuvre commune sur l'entablement laisse entendre que ces renforts sont issus d'un même lot, fourni par un même artisan. Une variante, caractérisée par des tenons en forme de queue d'aronde, n'est représentée que par un seul exemplaire.

Figure 5: Emplacement des crampons à tenons en forme de torsades

Les tenons se distinguent également par leurs finitions. Hormis les agrafes possédant des extrémités torsadées ou en queue d'aronde, les autres tenons présentent tous des crans, réalisés à l'aide d'un outil tranchant. De nombreuses variantes ont été observées concernant le nombre et la disposition de ces derniers. Dans certains cas, ils sont présents uniquement sur les angles externes du tenon. Dans d'autres, ils le sont à la fois sur les angles externes et internes. On observe également deux variantes en ce qui concerne le plan de frappe de l'outil ayant servi à former ces crans (figure 6). Dans le premier, l'outil est posé perpendiculairement

à l'une des faces latérales du tenon. Dans le second, l'outil est maintenu à 45° par rapport à l'axe longitudinal du crampon.

Figure 6 : Méthodes d'impression des crans sur les tenons des crampons prélevés

Le soin apporté à la finition des tenons n'a aucun rôle fonctionnel apparent, puisque ces derniers sont intégralement scellés au plomb. Toutefois, une variante observée pourrait être révélatrice des habitudes de travail d'un artisan en particulier, comme cela est d'ailleurs le cas pour les tenons torsadés.

Une caractéristique de cet ordre peut être plus particulièrement associée à une disposition localisée sur le bâtiment. Il s'agit des crampons dont les tenons sont crantés à la fois sur leurs faces externes et internes. Ces derniers sont présents uniquement sur la façade nord, ainsi que sur les deux massifs de flanquement nord-est et nord-ouest (figure 7). Ainsi qu'évoqué *supra*, cette partie de l'édifice a subi d'importants dommages à l'occasion de l'incendie de la charpente de la nef en 1877. Le schéma de disposition des éléments de renfort suggère que cette caractéristique technique puisse être liée à la campagne de restauration consécutive à cet incident.

Figure 7: Emplacement des crampons à tenons crantés à la fois sur leurs faces externes et internes.

1.3.3. La mise en forme par laminage

Quatre-vingt éléments de renfort, soit 18,8% du corpus prélevé, présentent des faces parfaitement planes, sans les bosselures caractéristiques d'un martelage. Les arêtes sont orthogonales, régulières et rectilignes. L'épaisseur et la largeur du corps des crampons sont également régulières (figure 8). Ces caractéristiques suggèrent que les agrafes en question ont été mises en forme à partir d'un métal ayant subi un laminage. Ce procédé n'étant apparu, pour les alliages ferreux, qu'au milieu du XVIII^e siècle³³, il est indubitable que les exemplaires présentant ces caractères aient été disposés sur le bâtiment à l'occasion de campagnes de consolidation relativement tardives.

Figure 8 : Crampon formé par laminage.

Certaines informations techniques apparaissent donc corrélées avec les modalités de disposition des renforts métalliques sur la tour de Mutte. La plupart des crampons à tenons torsadés sont placés sur la corniche de l'entablement situé à la base de la terrasse de l'édifice. Il s'agirait d'un petit lot d'objets produits par un même artisan, et disposés de manière concomitante sur l'édifice. Les individus, dont les tenons sont crantés à la fois sur leurs faces externes et internes, pourraient quant à eux avoir été disposés à l'occasion d'une campagne de restauration consécutive à l'incendie de 1877. Enfin, la mise en forme par laminage de certains crampons fournit un terminus *post quem* à leur mise en place. Ces éléments permettent de proposer une chronologie relative du renforcement de la maçonnerie de la tour de Mutte.

1.4. L'apport de l'étude analytique des scellements au plomb dans la mise en évidence d'ensembles cohérents

³³ Calmon, Cenac 1994, p. 3 ; Belhoste 1996.

Près de trois cents échantillons de plomb de scellement, issus des parements externes des façades ainsi que de la voûte de la salle de la cloche, ont été prélevés et analysés par LA-ICP-MS. Le plomb est un matériau de mise en œuvre aisée, employé à la couverture des édifices ou au scellement des renforts métalliques. Le métal contient des éléments chimiques mineurs ou présents à l'état de traces, caractéristiques du minerai exploité. Du fait de la facilité de recyclage du plomb, la signature chimique originelle du minerai tend toutefois à s'effacer rapidement au gré du mélange d'alliages d'origines diverses. Cependant, les scellements de plomb présentent une signature chimique caractéristique de ce mélange. Ainsi, les plombs de scellement issus d'une même coulée doivent présenter une composition chimique commune³⁴. Un traitement statistique multivarié³⁵ (Classification Ascendante Hiérarchique) a ainsi été appliqué sur les teneurs de neuf éléments traces présents dans le plomb. L'objectif de ces analyses est de définir des groupes d'échantillons présentant une bonne cohérence chimique. L'interprétation des résultats de cette analyse statistique amène à proposer sept groupes chimiques de scellements. Leur répartition spatiale sur les façades extérieures de la tour, ainsi que sur la voûte de la salle de la cloche, est présentée sur la figure 9.

Figure 9 : Répartition des groupes de composition chimiques des plombs de scellement prélevés sur les façades externes de la tour (en haut) et de la voûte de la salle de la cloche (en bas).

Les façades extérieures de la tour

Certains groupes sont très dispersés sur les façades, sans organisation apparente, ce qui peut être expliqué par le caractère ciblé des interventions effectuées pour la consolidation de la maçonnerie. D'autres groupes de composition chimique du plomb semblent toutefois former des ensembles plus cohérents. La classe 7 (orange) est présente essentiellement au niveau des écoinçons de la baie de l'abat-son oriental, ainsi que sur l'entablement soutenant la terrasse, sur les façades est et sud. Les scellements du groupe 4 (bleu) sont quant à eux disposés majoritairement sur les polylobes des baies de la salle de la cloche. Une partie des scellements de plomb attribués aux groupes 1 (bordeaux) et 2 (rose), par ailleurs chimiquement proches, sont disposés sur le gable de la baie nord et composent un ensemble de mise en œuvre cohérent.

La voûte de la salle de la cloche

Trente-neuf scellements en plomb prélevés sur la voûte de la salle de la cloche ont été intégrés aux analyses multivariées. Les plombs attribués au groupe 6 (vert) apparaissent employés comme scellement des agrafes fixées sur l'intrados des arcs de la voûte. Les plombs formant le groupe 4 (bleu) sont liés aux agrafes fixées sur les flancs de ces arcs. Enfin, les plombs attribués au groupe 7 (orange) sont liés aux agrafes fixées sur l'intrados des voussures formant les bras orientaux de la voûte.

³⁴ L'Héritier *et al.* 2016.

³⁵ Le terme « analyses statistiques multivariées » désigne un ensemble de techniques reposant sur l'analyse de plusieurs (plus de deux) variables. Dans le cas présent, la signature chimique des métaux est définie par les teneurs d'un grand nombre d'éléments chimiques. Considérer un ou deux de ces éléments est insuffisant pour déterminer la signature chimique. On a donc recours à des outils statistiques offrant la possibilité d'analyser simultanément les teneurs de tous les éléments chimiques d'intérêt.

La composition chimique des scellements de plomb révèle donc des ensembles de mise en œuvre cohérents, qui signeraient différentes phases de travaux.

1.5. Fer ou acier ? Le métal des crampons

Trente-neuf crampons ont fait l'objet d'examens micrographiques et métallographiques. Nous décrivons par conséquent les caractéristiques majeures de la microstructure des éléments de renfort examinés.

Une méthode de calcul du taux de carburation du métal développée par Pagès *et al.* (2008) et L'Héritier *et al.* (2013) a été employée pour qualifier la matrice métallique des renforts ferreux. Parmi les 39 sections observées après attaque, 23 révèlent un métal de structure majoritairement ferritique. Seul le crampon MUT56E18³⁶ est composé d'un métal à dominante ferrito-perlitique (0,2% mass. de C), permettant de le qualifier d'« acier composite ». La matrice métallique du crampon MUT56N32 peut quant à elle être qualifiée d'« hétérogène ». La structure du métal est à dominante ferritique dans la plupart des cas. Des plages aciérées (en général 0,5-0,6% mass. de C) sont toutefois régulièrement observables (dans 18 cas sur 39). Six crampons présentent une structure exclusivement ferritique, et seize autres apparaissent composés de zones carburées (> 0,2-0,3% mass. C) sur moins de 5% de la surface observée.

Quatre renforts, les agrafes MUT54N19, MUT56E13 et MUT54E16, ainsi que le fragment de tirant MUT62SW01, présentent de manière certaine une soudure, prouvant que le métal a été replié, dans ce cas, selon l'axe longitudinal de la pièce de métal travaillée.

Des structures fantômes sont par ailleurs observables sur environ la moitié des sections examinées (18 individus sur 39). Ces marbrures sont dues à une hétérogénéité chimique au sein de la structure, impliquant le phosphore ou l'arsenic. Ce phénomène a été étudié plus particulièrement par Stewart *et al.* (2000), ainsi que par Neff, Dillmann (2001) et Vega *et al.* (2003). Ces structures ont par ailleurs été souvent observées lors de l'étude des déchets métalliques issus des sites de production du fer ayant exploité la minette lorraine. Ces structures ont été attribuées à la présence de phosphore dans le métal.

La propreté inclusionnaire du métal apparaît très variable. Les inclusions représentent 0,5% de la surface observée pour l'individu le plus « propre », et 7,7% pour le plus « sale ». La majorité des renforts ferreux sont caractérisés par une propreté inclusionnaire comprise entre 1 et 4%. Les agrafes mises en œuvre sur le gable de l'abat-son nord présentent une propreté inclusionnaire relativement mauvaise par rapport aux individus des autres groupes. Les renforts de la façade est, ainsi que ceux prélevés sur divers massifs de flanquement, paraissent globalement plus propres. La répartition des inclusions au sein du métal varie sensiblement selon les cas. Certaines sections montrent des inclusions formant des alignements. D'autres prélèvements montrent des inclusions peu déformées, et sans organisation particulière.

³⁶ La nomenclature utilisée pour identifier les crampons se compose de trois éléments : un nombre correspondant à l'altitude de l'étage de l'échafaudage sur lequel le crampon a été prélevé ; une lettre qui correspond à l'orientation cardinale de la façade de l'édifice sur laquelle le crampon a été prélevé ; un nombre correspondant à une incrémentation pour chaque combinaison niveau-façade.

Les critères micrographiques de qualification des sections (structure du métal, propreté inclusionnaire, faciès des inclusions,...) varient de manière significative à l'échelle du corpus. Ceci peut s'expliquer aisément par le caractère hétérogène de ce dernier, les éléments métalliques ayant été disposés à l'occasion de différents chantiers, et cela sur une période de plusieurs siècles. Toutefois le faciès relativement brut du métal, marqué notamment par la propreté inclusionnaire, ainsi que la présence de nombreuses plages carburées informes constituant des reliques de la réduction du minerai, constitue une caractéristique commune à la majorité des renforts étudiés. Ainsi, quelle que soit la période concernée, on pourrait avoir destiné de manière privilégiée un métal relativement peu ouvré pour le fer architectural, ou tout au moins pour les renforts. Ce constat rejoint des observations effectuées sur d'autres édifices gothiques³⁷.

1.6. Datation de quatre crampons

Quatre crampons ont pu faire l'objet d'une datation radiocarbone au Laboratoire de Mesure du Carbone 14 (CEA Saclay), en prélevant du carbone dans les parties carburées du métal³⁸. La pièce MUT36E01 provient du sommet de la partie inférieure de la tour construite au XIII^e siècle. Les crampons MUT52N15 et MUT54N21 sont issus du gable de l'abat-son nord. Le crampon MUT54AF était disposé sur la voûte de la salle de la cloche (figure 10).

Figure 10 : Résultats calibrés des datations radiocarbone effectuées sur une sélection de crampons.

Le métal du crampon MUT36E01 a certainement été produit à la fin du XII^e ou au début du XIII^e siècle. L'agrafe MUT52N15 aurait été produite au cours du XIV^e siècle. Les deux crampons MUT54N21 et MUT54AF sont contemporains, avec des dates indiquant le début du XV^e siècle. La datation du crampon MUT52N15 ne correspond à aucune phase de construction, et sera discutée ci-dessous. Les datations des trois autres crampons sont antérieures de quelques décennies aux phases de construction associées. Ce décalage peut être expliqué par la méthode de datation employée. La datation radiocarbone ne donne pas la date de l'opération de réduction du minerai en tant que telle, mais elle fournit la date à laquelle le bois destiné à produire le charbon de bois a cessé d'assimiler le carbone de l'atmosphère. Ainsi, le bois provenant du cœur des arbres peut être antérieur de plusieurs décennies à sa transformation en charbon. Un léger décalage entre la date calendaire obtenue et la production effective du métal est donc en théorie possible. La réutilisation de « vieux fers » peut également être envisagée. Une autre explication possible est aussi la constitution de stocks de fer utilisés progressivement par les forgerons. Tenant compte de ces hypothèses, on peut supposer que les renforts MUT36E01, MUT54AF et MUT54N21 ont été mis en œuvre à l'époque des deux principales phases de construction, le XIII^e et le XV^e siècle.

En revanche, le métal de l'agrafe MUT52N15 semble avoir été produit plusieurs décennies avant celui de l'agrafe MUT54N21, alors qu'elles ont été toutes deux mises en œuvre sur le gable de l'abat-son nord de l'édifice. Toutefois, ce groupe est composé d'éléments aux caractéristiques morphométriques et techniques variées, dont la plus remarquable est le laminage de certaines pièces. Le métal de cet ensemble aurait donc été produit à trois époques différentes : le XV^e siècle (MUT54N21) correspond bien à la phase de

³⁷ L'Héritier, Dillmann 2011.

³⁸ Leroy S. *et al.* 2015.

construction du clocher ; les pièces laminées obligatoirement mises en place après le milieu du XVIII^e siècle correspondent probablement aux réparations consécutives à l'incendie de 1877 ; en revanche, la datation au XIV^e siècle (MUT52N15) suggère que des pièces plus anciennes ont été réemployées lors des phases de consolidation tardives, ce que confirme l'homogénéité chimique des plombs scellant ces pièces.

1.7. Conclusions

Les résultats obtenus à partir de la caractérisation chimique des plombs de scellement confirment les observations faites *in situ* à l'occasion des campagnes de prélèvement concernant la régularité de la disposition de certains ensembles de fers architecturaux. En croisant les informations chimiques des plombs avec les caractéristiques morphologiques et techniques des renforts, trois groupes se démarquent :

- Les crampons disposés sur la voûte de la salle des cloches. Ils présentent des caractéristiques morphologiques similaires, et sont tous issus d'une mise en forme par martelage. La signature chimique des scellements de plomb révèle une mise en œuvre rationnelle, effectuée en trois temps. Ces indices concourent à attribuer les agrafes à la construction de l'édifice.

- Les crampons disposés sur les écoinçons³⁹ et l'entablement de la façade est. Ils présentent également des caractéristiques morphologiques et techniques proches, et ont tous été mis en forme par martelage. La signature des scellements de plomb indique qu'ils ont tous été disposés dans un laps de temps relativement court, marqué par la fonte d'un même mélange de plombs.

- Les crampons disposés sur le gable de la baie nord. La composition chimique des plombs de scellement laisse supposer ici également un groupe de mise en œuvre. En revanche, ce groupe intègre aussi bien des fers martelés que des crampons issus de laminage. Par ailleurs, les crampons montrent tous une méthode de finition similaire, représentée par les crans des tenons. Il est fort probable, d'après ces indices, que les crampons aient été placés sur l'édifice à l'occasion d'une consolidation tardive, probablement consécutive à l'incendie de 1877. La présence dominante d'individus martelés interpelle toutefois. Le chantier de restauration aurait-il pu employer des « vieux fers », récupérés sur d'autres parties de l'édifice ?

2. A la recherche de l'origine du fer utilisé dans la construction de la tour de Mutte

Ces dernières années ont vu le développement de plusieurs méthodologies analytiques permettant de traiter à la fois de l'origine technique⁴⁰, mais également géographique⁴¹, des objets ferreux. Parallèlement, la connaissance de l'histoire des premiers développements de la sidérurgie lorraine a considérablement progressé du fait de programmes de recherche

³⁹ Ce terme désigne les parties de la maçonnerie délimitées par les arcs des baies, les massifs de flanquement des façades et l'entablement situé sous la terrasse de la tour.

⁴⁰ Dillmann, L'Héritier 2007 ; Disser *et al.* 2014.

⁴¹ Desaulty *et al.* 2009, Leroy S. *et al.* 2012, Disser *et al.* 2016.

archéométallurgique initiés dès la fin des années 1980⁴². Ceci a permis de dresser une cartographie chimique des zones de production sidérurgiques anciennes, parmi lesquelles la Lorraine centrale (vallée de la Moselle) est à ce jour très bien documentée, et de démontrer que la minette lorraine y était le minerai de fer le plus abondamment utilisé durant tout le Moyen Âge (voir *infra* 3.1). Les études historiques précisent plusieurs traits fondamentaux de la production du fer à l'époque médiévale, notamment du point de vue de l'administration des activités et de l'introduction des innovations techniques, telles que le procédé indirect.

Le chantier de construction de la partie supérieure de la tour de Mutte constitue, de par sa chronologie, un laboratoire pertinent pour étudier les marchés du fer mis en place à la fin du Moyen Âge en Lorraine. On s'intéressera en premier lieu à la place occupée par les produits issus de la filière indirecte dans l'alimentation des réseaux d'échange, puisque la fin du XV^e siècle est, pour la Lorraine, une période de transition technique au cours de laquelle coexistent les filières techniques directe et indirecte. On cherchera par ailleurs à identifier une partie des entités productrices ayant alimenté les marchés du fer à cette époque, information essentielle pour mieux percevoir l'administration des activités sidérurgiques.

Les études archéométriques ont été réalisées sur une sélection de crampons issus des trois ensembles identifiés ci-dessus. Les deux premiers, associés à la construction de l'édifice, permettent d'étudier les modalités d'approvisionnement du chantier. Le dernier, certainement lié à une phase de restauration, soulève la question de la récupération de matériaux anciens par les chantiers de consolidation. Cette sélection est renforcée par des renforts prélevés sur d'autres parties de la tour, en particulier sur les *oculi* polylobés des baies supérieures, les *oculi* des baies inférieures, le massif de flanquement sud-est, et les pinacles encadrant la terrasse.

2.1. Distinction des procédés techniques de production du fer

Plusieurs sources documentaires laissent présumer de la mise en place, au cours du XV^e siècle, d'ateliers sidérurgiques employant le procédé indirect en Lorraine⁴³ (voir aussi *infra* 3.3.). Le chantier de construction de la partie supérieure de l'édifice a ainsi pu être approvisionné en métal issu de cette filière. La distinction des filières techniques en sidérurgie ancienne a fait l'objet de plusieurs travaux récents⁴⁴. Elle repose sur la caractérisation chimique des inclusions présentes dans les produits ferreux. Dans le cas du procédé direct, à savoir l'obtention du métal en phase solide, les inclusions sont générées au cours de l'opération de réduction du minerai, et restent piégées dans le métal tout au long de la chaîne opératoire, jusqu'à l'obtention de l'objet. Le procédé indirect reposant sur la réduction du minerai en phase liquide, la scorie de réduction, moins dense que le métal en fusion, est évacuée au cours de l'opération. La fonte résultante est ainsi exempte d'inclusions de réduction. Cette fonte doit toutefois subir une décarburation ultérieure, afin d'obtenir des alliages forgeables, fers ou aciers. Au cours de l'affinage de la fonte, certains éléments contenus dans la fonte sont re-oxydés et se trouvent piégés dans les inclusions du métal à l'issue de l'opération. Ces inclusions présentent une signature chimique distincte de celle des inclusions générées par la réduction du métal par le procédé direct. Les teneurs des principaux composés de la scorie, à savoir la magnésie (MgO), l'alumine (Al₂O₃), la silice (SiO₂), le pentoxyde de phosphore (P₂O₅), l'oxyde de potassium (K₂O), la chaux (CaO) et l'oxyde de

⁴² Leroy 1997, Leroy M. *et al.* 2015.

⁴³ Girardot 1976, Horikoshi 2007.

⁴⁴ Dillmann, L'Héritier 2007, Disser *et al.* 2014.

manganèse (MnO), permettent par conséquent de distinguer la filière technique par laquelle le métal est produit. Un référentiel de comparaison a été constitué par Dillmann et L'Héritier, en analysant des produits sidérurgiques attribuables sans ambiguïté à l'un ou l'autre des procédés. Les 138 objets qui le composent proviennent donc de contextes nettement antérieurs ou postérieurs à la période de transition technique.

Les inclusions de trente-cinq crampons de la tour de Mutte ont été caractérisées chimiquement par MEB-EDS. La question posée présentant un caractère dichotomique (« Le métal est-il issu de la filière directe ou de la filière indirecte ? »), une analyse multivariée adaptée à ce type de formalisme a été employée : la régression logistique. Un modèle statistique apte à distinguer efficacement les 138 produits de filière directe et indirecte composant le référentiel a été calculé. Ce modèle a ensuite été employé à déterminer l'origine technique des crampons de la tour de Mutte.

La majorité des renforts ferreux étudiés sont issus de la filière indirecte. Seuls onze individus ont été produits par le procédé direct. Ceux-ci sont répartis sur l'ensemble de la hauteur de la tour ayant fait l'objet de prélèvement : au niveau de la salle de la cloche, sur le gable de la baie nord, sur les écoinçons de l'abat-son et sur l'entablement de la façade orientale, sur les massifs de flanquement, ainsi que dans un des pinacles du niveau de la terrasse.

Les résultats de l'analyse mettent bien en évidence un usage synchrone des produits des filières directe et indirecte. Cette association suggère que le chantier de construction de la tour de Mutte a été approvisionné en métal issu de différents ateliers utilisant soit le procédé direct, soit le procédé indirect. Il s'agirait dans ce cas d'un témoin important de la coexistence, en Lorraine à la fin du Moyen Age, des deux filières techniques de réduction du minerai de fer.

L'emploi de métal issu du procédé indirect dans l'architecture gothique du Bas Moyen Age ne connaît encore à ce jour que quelques occurrences. Les renforts de la charpente de la cathédrale Saint-Paul de Liège, datée de 1330, en constitueraient la plus ancienne⁴⁵. Des éléments métalliques issus de la cathédrale d'Auxerre constituent les attestations les plus anciennes de l'emploi de fers indirects dans l'architecture gothique du royaume de France, à la fin du XIV^e siècle⁴⁶. Par ailleurs, un renfort prélevé dans la cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul de Troyes, et dont la mise en place est datée de 1460, illustre les débouchés de cette filière en Champagne⁴⁷. Une vingtaine d'années plus tard, du fer issu du procédé indirect est disposé sur un monument de la ville de Metz, en quantités apparemment importantes. Les études réalisées sur le chaînage du triforium de la cathédrale d'Amiens suggèrent également une utilisation de métal indirect en Picardie à la fin du XV^e siècle⁴⁸.

Si l'on considère que le fer provient de sources locales (voir discussion *infra*), les renforts disposés sur la tour de Mutte constitueraient l'attestation matérielle la plus ancienne en faveur de l'implantation du procédé indirect en Lorraine. Les résultats apportés par l'étude des renforts de la tour de Mutte posent de nouveaux jalons quant à l'appréhension des

⁴⁵ Mertens *et al.* 2009 ; Maggi *et al.* 2012.

⁴⁶ L'Héritier *et al.* 2013.

⁴⁷ L'Héritier *et al.* 2007.

⁴⁸ Dillmann 2009.

modalités de diffusion d'une innovation technique majeure de la fin du Moyen Age. Les recherches menées sur le sujet depuis un peu plus d'une décennie permettent une première appréhension de l'importance relative des produits de la filière indirecte dans les marchés du fer du nord de la France. Il apparaît, en considérant le débouché spécifique que constitue l'architecture monumentale, que l'utilisation du fer indirect y connaît un fort accroissement au cours du XV^e siècle, et plus particulièrement dans sa seconde moitié. Ce cas d'utilisation du métal dans l'architecture gothique à Metz présente, avec un éclairage particulier, une image en adéquation avec les connaissances historiques et archéologiques acquises sur ce sujet, notamment par le biais des travaux réalisés sur la Champagne et la Bourgogne⁴⁹.

S'agissant du fer issu du procédé indirect, on pourrait opportunément se poser la question d'un choix fondé sur une différence de qualité. Toutefois, de récentes études portant sur d'autres édifices de ce type montrent que les fers indirects présentaient des comportements mécaniques similaires à ceux de leurs pendants directs⁵⁰. La situation sur la tour de Mutte semble refléter cet état de fait ; aucune appréciation qualitative des fers relative à leur filière de production n'est pour l'instant perceptible.

2.2. Détermination de la provenance des fers issus du procédé direct

L'étude archéométallurgique des renforts ferreux disposés sur la tour de Mutte peut en outre fournir des éléments susceptibles d'identifier les acteurs sidérurgiques impliqués dans l'approvisionnement des marchés qui ont alimenté les chantiers de construction monumentale de la cité messine à la fin du Moyen Âge. Cette identification repose sur l'établissement d'une compatibilité chimique entre les renforts et les secteurs de production sidérurgique en activité lors du chantier de construction. Cette compatibilité repose sur la comparaison de la signature chimique des inclusions de scorie piégées dans la matrice métallique des objets avec celle des scories produites par la réduction des minerais de fer. Cette démarche n'est applicable qu'aux produits ferreux issus du procédé direct. En effet, les inclusions présentes dans les objets issus du procédé indirect sont générées par l'oxydation de certains éléments de la fonte et éventuellement d'ajouts lors de l'affinage. Dans ce cas, les inclusions ne sont donc pas associées à la réduction du minerai. Par conséquent, l'origine du métal ne peut être déterminée que pour les onze crampons formés par du métal d'origine directe.

Il est en premier lieu nécessaire de définir la signature chimique caractéristique des secteurs de production sidérurgique. Pour ce faire, 188 scories de réduction et minerais de fer issus de 32 ateliers sidérurgiques antérieurs au XVI^e siècle, découverts dans l'espace lorrain lors des recherches archéologiques récentes (*infra 3.1.*) ont fait l'objet d'une caractérisation chimique par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS) au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CNRS, Vandœuvre-lès-Nancy). Cette méthode permet de doser un large spectre d'éléments chimiques (plus d'une cinquantaine), parmi lesquels plusieurs éléments lourds de la série des lanthanides. Ces éléments sont présents à l'état de traces, c'est-à-dire en très petites quantités dans le matériau (de l'ordre du microgramme par gramme de matière). La compatibilité chimique entre objets ferreux et ateliers sidérurgiques repose sur la conservation de certains rapports élémentaires caractéristiques du minerai. En effet, ces rapports sont identiques dans les scories produites pendant la réduction de ce minerai, et *de facto* dans les inclusions de scorie piégées dans le

⁴⁹ L'Héritier *et al.* 2010, Dillmann, L'Héritier 2016.

⁵⁰ L'Héritier, Dillmann 2011.

métal. En fonction de leur comportement thermodynamique et de potentielles pollutions pouvant affecter le système de réduction, seuls certains éléments chimiques parmi la cinquantaine dosée peuvent être utilisés pour déterminer la provenance du métal. Ces éléments ont été déterminés à partir de réductions expérimentales de minerai⁵¹.

Un rapport élémentaire donné peut être caractéristique de plusieurs minerais distincts. Il est donc nécessaire de considérer simultanément un grand nombre de rapports élémentaires pour assurer une distinction suffisante des secteurs de production sidérurgique. Dans le cas de la Lorraine, quinze rapports élémentaires impliquant cinq éléments majeurs et dix éléments traces ont été utilisés pour distinguer ces secteurs. Des analyses statistiques multivariées descriptives, utilisées *supra* pour la détermination de groupes de coulée de plombs de scellement, ont été appliquées au référentiel géochimique constitué pour la Lorraine. Dans ce cas, six groupes sont distingués (figure 11). Dans un second temps, chaque échantillon est identifié par rapport au minerai de fer associé. Dans le cas présenté, cette distinction est parfaite, puisque chaque groupe chimique caractérise la réduction de minerais de fer distincts. Il est donc possible dans ce cas d'isoler chimiquement les déchets associés à la réduction d'un minerai donné.

Figure 11 : En bas : résultats d'une classification ascendante hiérarchique définissant des ensembles géochimiques cohérents au sein du référentiel lorrain ; en haut : extension géographique approximative des ensembles géochimiques constitués.

Les résultats de l'analyse multivariée du référentiel sidérurgique lorrain montrent qu'il est possible de déterminer sans ambiguïté l'origine d'un objet ferreux de provenance inconnue, si tant est que cet objet ait été produit par la réduction d'un des six minerais caractérisés à l'heure actuelle. Pour chacun des onze crampons issus du procédé direct, une douzaine d'inclusions ont été caractérisées chimiquement par ICP-MS. Un dispositif équipé d'un système à ablation laser a été employé, afin de prélever uniquement les inclusions de scorie sur la section polie. Les quinze éléments chimiques utilisés précédemment pour identifier les ensembles géochimiques de production au sein du référentiel lorrain servent à définir la signature chimique caractéristique de chaque crampon d'origine inconnue. Une nouvelle série d'analyses multivariées est réalisée sur un jeu de données comprenant à la fois le référentiel géochimique et les inclusions de scorie des objets (figure 12, partie gauche).

Figure 12 : A gauche : résultats d'une classification ascendante hiérarchique réalisée à la fois sur les ensembles géochimiques lorrains et les inclusions des onze renforts analysés issus du procédé direct ; à droite : résultats d'une classification ascendante hiérarchique réalisée sur l'ensemble de production associé à l'utilisation du minerai oolithique aalénien (minette) et les inclusions des onze renforts analysés issus du procédé direct.

Les inclusions de scorie contenues dans les onze crampons sont toutes attribuées à l'ensemble géochimique de production associé à la réduction du minerai oolithique aalénien, la minette lorraine. A l'échelle de l'espace lorrain, il s'agit donc de l'origine la plus probable pour le métal des crampons. Afin de valider de manière absolue la compatibilité chimique entre les crampons et l'ensemble de production associé à la minette, un dernier test multivarié est réalisé sur un corpus restreint regroupant uniquement l'origine probable et les objets de provenance inconnue (figure 12, partie droite). Dans le cas présenté, les inclusions de scorie des objets ne peuvent être distinguées des scories et minerais composant l'ensemble de production. Par conséquent, la compatibilité chimique de l'ensemble de production et des

⁵¹ Desaulty 2009, Leroy S. *et al.* 2012, Disser *et al.* 2016.

objets permet d'affirmer avec une très forte probabilité que ces derniers ont été produits à partir de la réduction de la minette lorraine. L'extension spatiale de l'ensemble de production associé à la minette comprend deux zones : le Plateau de Haye et le Pays-Haut. Tous deux ont fait l'objet d'exploitation au cours du Moyen Âge (*infra* 3.1.). Le métal mis en œuvre sur la tour de Mutte provient ainsi certainement d'un de ces deux secteurs.

3. La tour de Mutte dans l'histoire de la sidérurgie lorraine

3.1. L'emploi de la minette dans la production du fer : les acquis des recherches récentes

Jusqu'à une date relativement récente, on a considéré que les premiers développements de la sidérurgie en Lorraine étaient liés à l'utilisation de minerais riches récoltés dans des gisements de surface. *A contrario*, le minerai de fer oolithique ou minette de Lorraine, beaucoup moins riche en fer, était réputé n'avoir été utilisé qu'à partir de la seconde moitié du XVIII^e s. (usines de Wendel à Hayange), puis de manière industrielle à partir des années 1870-1880. Les arguments avancés pour nier toute utilisation ancienne s'appuyaient sur la faible teneur en fer (autour de 30-35 % en moyenne) qui ne pouvait permettre d'obtenir des rendements satisfaisants, et sur la trop grande richesse en calcaire et en phosphore qui entraînait la production d'un fer de mauvaise qualité, difficile à forger⁵². Ces arguments se basaient sur les *a priori* des milieux scientifiques et industriels minimisant souvent le niveau des savoir-faire techniques des périodes antérieures à la Révolution industrielle et qui, de plus, raisonnaient en termes de sidérurgie moderne : en effet, dans la première moitié du XIX^e siècle, l'emploi de la minette de Lorraine est limité parce que les fontes produites, trop phosphoreuses, sont cassantes et, de plus, agressent les parois des convertisseurs lors de leur affinage. Ce problème sera résolu par la mise en point du procédé Thomas-Gilchrist, permettant de traiter les fontes phosphoreuses, qui va entraîner le développement très rapide de la mise en exploitation du bassin minier et sidérurgique de Lorraine centrale et septentrionale, à partir de la décennie 1880-1890. Il paraissait alors évident que ces « problèmes techniques » étaient insurmontables pour les sidérurgistes des époques antique et médiévale.

Pourtant, les recherches archéométallurgiques menées depuis la fin des années 1980⁵³ ont complètement modifié la trame de l'histoire du développement de la production primaire du fer en Lorraine avant le XVI^e siècle, en démontrant que la minette apparaissait comme le minerai de fer le plus largement utilisé durant tout le Moyen Âge, et peut-être même dès l'Antiquité, alors même que les gîtes de minerais de surface, pourtant facilement accessibles, étaient largement délaissés⁵⁴. Plus de 200 emplacements de sites miniers et sidérurgiques anciens, antérieurs à la guerre de Trente Ans, ont été répertoriés le long des plateaux qui constituent la *cuesta* bajocienne (plateau des Côtes de Moselle, du Pays-Haut au Plateau de

⁵² Voir les termes du débat dans Leroy M. *et al.* 2015, pp. 7-10.

⁵³ Programme de recherche conduit de 1989 à 2005 par le Laboratoire de Métallurgies et Cultures (IRAMAT-UMR 5060), le Laboratoire d'Archéologie des Métaux (Musée de l'Histoire du fer, CCSTIFM) et le Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CNRS), sous la direction de Marc Leroy, avec le soutien du Service régional de l'archéologie de Lorraine (MCC-DRAC Lorraine), de la Région Lorraine, du département de Meurthe-et-Moselle, de l'Office National des Forêts et de l'INRAP.

⁵⁴ Leroy 1997, Leroy M. *et al.* 2015.

Haye) où sont associés géographiquement minette et minerai de fer fort, deux minerais de composition radicalement différente. Dans plus de 90 % des cas, le minerai utilisé dans ces ateliers est la minette, et ce même lorsqu'ils ne sont pas implantés directement à proximité des affleurements⁵⁵.

Ces résultats modifient considérablement notre perception de la maîtrise des savoir-faire techniques dès ces époques anciennes. La compréhension détaillée des processus de transformation de la minette dans les fourneaux de réduction, par les études archéométriques et les reconstitutions expérimentales, amène à considérer que la composition chimique singulière de la minette la rend remarquablement adaptée au procédé de réduction directe, en procurant notamment d'intéressants rendements en fer, qui compensent la faible teneur initiale du minerai, mais qui nécessitent toutefois des gammes de températures de fonctionnement significativement plus élevées qu'avec un minerai à gangue siliceuse, entraînant des conditions de fonctionnement proches, par certains aspects, de celles du procédé indirect. Il s'agit donc d'un acquis fondamental du point de vue plus général de l'histoire des techniques.

Les concentrations de sites archéologiques découverts sur le plateau d'Hussigny dans le nord du Pays-Haut, sur celui délimité par les vallées de la Fensch et de l'Orne dans le sud du Pays-haut, ou sur celui encadré par les vallées de la Meurthe et de la Moselle (Plateau de Haye), identifient plusieurs espaces de production actifs au cours du Moyen Age (figure 13). Certains d'entre eux correspondent très probablement aux secteurs de production que nous font connaître, à partir du milieu du XII^e siècle, les sources historiques dépouillées⁵⁶ : les « forges » de la Châtellenie de Briey appartenant au comté de Bar dans la forêt de Briey-Moyeuve ; les « forges » mentionnées dans le ban de Chaligny, dépendant du comté de Vaudémont ; celles des abbayes de Justemont et de Jamailles ou des seigneurs de Florange⁵⁷. Il s'agit d'exemples assez remarquables de correspondance entre les données archéologiques et les sources historiques. Ces ensembles, actifs au cours des XIII^e, XIV^e et XV^e siècles, ont ainsi pu servir de sources d'approvisionnement pour les besoins de la ville de Metz et notamment le chantier de la cathédrale.

Figure 13 : Vestiges archéologiques d'ateliers de production du fer et de sites d'extraction minière datés de la fin du Moyen Age et du début de l'Epoque moderne (XIII^e – XVI^e s.) en Lorraine centrale et septentrionale. Plusieurs ensembles pourraient correspondre aux espaces de production mentionnés dans les sources écrites (cartographie Marc Leroy).

3.2. La construction de la tour de Mutte et la question de l'implication du patriciat messin dans la production de fer régionale

⁵⁵ La nette différence de composition chimique entre ces deux types de minerais, qu'il s'agisse des teneurs des éléments majeurs comme le silicium, le calcium, l'aluminium ou le phosphore, et de leur rapport, mais aussi des nombreux éléments mineurs et en traces, permet d'identifier clairement la signature très particulière de la minette dans la composition des scories elles-mêmes. *A contrario*, un défaut de teneur dans ces éléments identifie une filiation avec un minerai à gangue siliceuse comme le fer fort.

⁵⁶ Girardot 1970, Horikoshi 2007.

⁵⁷ Leroy M. *et al.* 2015, pp.109-112. Dans les textes médiévaux, le terme de forge se rapporte à un établissement produisant du fer quel que soit l'étape de la chaîne opératoire concernée. Ainsi, les ateliers de réduction du minerai sont qualifiés de forge, au même titre que les ateliers de travail du fer. Rien ne permet donc de les dissocier.

Au cours des XIII^e, XIV^e et XV^e siècles, la ville de Metz qui compte près de 30 000 habitants est un important marché de consommation urbain, en même temps qu'un centre de commerce dominant dans l'espace régional⁵⁸. La ville connaît aussi durant cette période une intense activité dans le domaine de la construction urbaine. Une nouvelle enceinte fortifiée longue de plus de 5 km est construite dans la première moitié du XIII^e siècle. Outre la cathédrale, de nombreuses autres églises sont édifiées, plusieurs ponts sur la Moselle sont construits, des places sont aménagées et de nombreux hôtels patriciens et des bâtiments publics (greniers, Palais des Treize) bâtis. Les besoins en fer sont probablement considérables, ne serait-ce que pour la fabrication et l'entretien des outils des carriers et des maçons, mais aussi pour la fabrication des huisseries et des charpentes. Ont déjà été mentionnées les 50 000 livres de fer (environ une vingtaine de tonnes) apparaissant dans les comptes de construction du clocher et de la flèche de la tour de Mutte à la fin du XV^e siècle (*supra*). La ville de Metz constitue donc un important marché pour les produits sidérurgiques de la région et d'ailleurs. Les artisans du fer y semblent du reste nombreux, puisque la corporation des fèvres (forgerons) compterait une centaine de membres au XIII^e siècle⁵⁹ ; mais les productions ne sont pas connues en dehors de l'armurerie dont sont clients les princes lorrains, mais qui est aussi vendue sur les marchés extérieurs⁶⁰.

Dans ce contexte, la mainmise sur les revenus des forges des comtes de Bar de la châtellenie de Briey par les banquiers messins, tout au long des XIII^e et XIV^e siècles, prend un relief particulier. Les besoins financiers des comtes, puis ducs de Bar, les amènent dès la fin du XIII^e siècle à emprunter des sommes importantes auprès de banquiers messins, la puissance de la finance messine faisant de la ville de Metz, la banque des princes lorrains⁶¹. Pour couvrir les sommes prêtées, les comtes de Bar vont gager auprès de leurs créanciers une partie des revenus de leur domaine. Ainsi des revenus des bois et des forges de la châtellenie de Briey et des villages en dépendant⁶². Cette engagère (*waigeire*), dite de la Montagne, débutée en 1285, est plusieurs fois renouvelée au cours du XIV^e siècle. C'est ainsi, qu'au milieu du XIV^e siècle, la moitié du revenu annuel des forges de la châtellenie de Briey, localisées en forêt de Moyeuve et dans la vallée du Conroy, est perçue par les créanciers messins. Le contrat établi en 1329 fait même passer l'administration des biens sous le contrôle des financiers messins, qui en réalisent les comptes et auxquels les officiers du comte devaient prêter serment. Pour J. Schneider, à cette date, « la principale richesse minière de la région passait donc aux banquiers messins, qui eurent en fait l'entière disposition de cette engagère », la vérification comptable ne pouvant être effectuée par l'officier comtal. Au XIV^e siècle, ces banquiers comptent parmi les principaux représentants du patriciat messin et certains d'entre eux deviennent même conseillers attitrés du comte⁶³.

Si le Compte général des prévôtés du comté de Bar ne mentionne que des perceptions d'argent, il n'est pas irréaliste d'imaginer qu'une partie de la production des forges elles-mêmes puisse bénéficier aux mêmes personnages, qu'ils l'accaparent à leur profit ou qu'ils

⁵⁸ Schneider 1950, Girardot 1986 pp. 139-142.

⁵⁹ Schneider 1950, p. 239.

⁶⁰ Schneider 1950, p. 222, Girardot 1986, p. 140.

⁶¹ Schneider 1950, pp. 249-316.

⁶² Schneider 1950, pp. 350-354.

⁶³ Jean de Vy auprès du comte d'Edouard I^{er} au début du XIV^e siècle et Aubert Augustaire auprès du duc Robert I^{er} à la fin du même siècle (Girardot 1986).

facilitent son débouché sur des marchés où ils occupent des positions dominantes⁶⁴. Ainsi, bien que les ateliers de production du fer de la châtellenie de Briey soient affermés par l'autorité comtale à des artisans du fer moyennant le paiement de taxes journalières, on peut imaginer que la mainmise des patriciens messins sur ces revenus les incitent à en orienter la production vers les acheteurs travaillant dans la ville, et au premier titre les autorités municipales elles-mêmes, ces hommes étant membres des familles qui participent au gouvernement de la cité. Le fait que le fer des crampons prélevés dans la tour de Mutte soit issu de la réduction de la minette, seul minerai utilisé à cette période dans la châtellenie de Briey comme le montrent les recherches archéométallurgiques citées plus haut, appuie incontestablement cette hypothèse, même si d'autres secteurs du plateau des Côtes de Moselle ont pu aussi servir de zones d'approvisionnement⁶⁵.

Certes, cette analyse est surtout valable pour les XIII^e et XIV^e siècles (et donc pour les agrafes placées dans les *oculi* des grandes baies orientales terminées à la fin du XIII^e siècle). Elle est, en revanche, moins assurée pour la fin du XV^e, puisque les engagères sur les forges de la forêt de Moyeuve paraissent avoir été récupérées (au moins en partie) par le duc Robert I^{er} dans la dernière décennie du XIV^e siècle⁶⁶. Toutefois, parmi les crampons étudiés, ceux mis en place lors du chantier du clocher et de la flèche, et fabriqués par le procédé direct, sont bien produits à partir de ce même minerai et pourraient donc avoir une origine similaire⁶⁷. Par ailleurs, la ville de Metz possède, à la fin du XV^e siècle une forge à Ars-sur-Moselle, à quelques kilomètres en amont de la ville⁶⁸ ; dans ce secteur encore, le seul minerai de fer disponible est la minette. Dans la mesure où le clocher de la tour de Mutte est le beffroi municipal (monument possédant une forte charge symbolique et politique) et que sa construction est financée par la ville, donc par les familles qui la gouvernent, il est logique de penser que ces dernières y mobilisent aussi les ressources matérielles qu'elles contrôlent.

3.3. La construction de la tour de Mutte et la problématique de l'apparition et du développement du procédé indirect

L'apparition et le développement du procédé indirect (production de fonte dans un haut fourneau et opérations d'affinage de la fonte en acier et en fer) représentent une innovation majeure dans l'histoire de la sidérurgie européenne. Les étapes et la chronologie

⁶⁴ C'est semble-t-il le cas des productions agricoles spécialisées, dont l'élevage et le vin, provenant des domaines ruraux qu'ils possèdent ou qu'ils contrôlent (Schneider, 1950, Girardot 1986, p. 144).

⁶⁵ Ainsi, l'abbaye messine de Saint-Arnoul possède des ateliers de production de fer dans le Val Saint-Barthélemy, à proximité de la confluence Moselle – Meurthe, au nord de Nancy, dont la localisation est également identifiée par des vestiges archéologiques. Là aussi le minerai utilisé est la minette (Leroy M. *et al.* 2015). Une partie du fer qui y a été produit a pu aussi être acheminé dans la ville de Metz, au moins pour les besoins propres de l'abbaye ou y être vendu.

⁶⁶ Schneider 1950, Horikoshi 2007.

⁶⁷ Des forges sont toujours mentionnées dans les comptes de la prévôté de Briey aux XV^e et XVI^e siècles, à Moyeuve, en Conroy et à Ranguieux. D'autres appartiennent aux abbayes de Saint-Pierremont et de Jamailles.

⁶⁸ Le Journal de Jean Aubrion mentionne des forges neuves, propriété de la ville, à Ars-sur-Moselle en 1492, ainsi que la construction la même année d'une « forge à fer » au Saulcy à Metz (édition de 1857, pp. 287 et 292). On ne sait pas si l'établissement d'Ars existe déjà lors de la construction du clocher de la Mutte, une douzaine d'années plus tôt.

de son apparition ont fait l'objet de nombreuses recherches⁶⁹. La terminologie employée dans les sources écrites a longtemps servi de seule référence pour suivre la mise en place de cette nouvelle filière de production. Mais le gros écueil rencontré est que les termes qui apparaissent dans ces textes sont interprétés par l'historien en fonction de la terminologie technique qui a cours au moment de la transcription et de l'idée qu'il se fait de la technique en usage au moment où le texte est rédigé (par exemple, les termes *fournel* et *haut fournel* employés dans le nord du Pays-Haut ou dans la prévôté de Virton au XV^e siècle sont assimilés à une dénomination locale d'un appareil de type haut fourneau parce qu'on présuppose qu'il existe déjà à cette époque). Par ailleurs, les textes dans lesquels apparaissent ces termes ne sont pas des documents techniques, mais des documents le plus souvent d'ordre juridique ou financier. Ils ne sont pas rédigés par des spécialistes des techniques métallurgiques, mais par des comptables, des administrateurs ou des juristes. Les termes employés ne reflètent donc pas forcément une réalité technique, mais peut-être simplement le vocabulaire ou les connaissances que possède celui qui rédige les documents. De plus, même dans le cas où ces termes auraient une valeur technique, leur emploi et la généralisation de leur usage peuvent être de beaucoup postérieur à l'apparition de l'appareil technique qu'ils nomment. De la même manière, la production des premiers objets en fonte (principalement des boulets de canons) serait mentionnée dans plusieurs textes, dès le premier quart du XV^e siècle⁷⁰, mais cette identification repose là aussi sur une interprétation des termes employés qui reste sujette à discussion. De leur côté, les premières descriptions des appareils et des procédés ne semblent pas remonter avant le début du XVI^e siècle⁷¹.

Les recherches archéologiques et archéométriques permettent aujourd'hui d'avancer significativement sur cette problématique, tant du point de vue de la fouille des ateliers, que de l'étude des déchets de production, mais aussi des produits eux-mêmes, comme le montrent les études sur les fers utilisés dans l'architecture monumentale (*supra*). La démonstration de la disposition concomitante de fers issus des deux procédés techniques de production du fer sur le clocher de la tour de Mutte éclaire donc la phase de diffusion de la filière indirecte dans l'espace lorrain à la fin du Moyen Age. Ainsi, le chantier de la Mutte est approvisionné par ces deux sources de fer. Le fer issu du procédé direct provient exclusivement de la réduction de la minette. Sa fourniture est donc encore assurée par des ateliers régionaux : ce sont peut-être toujours ceux de la châtellenie barroise de Briey ; il peut s'agir aussi de celui d'Ars-sur-Moselle si on émet l'hypothèse que la forge connue en 1492 a pu déjà être en fonction quelques années plus tôt. L'existence d'une forge appartenant à la ville est en effet plausible, puisqu'on sait que pour le chantier du couronnement de la tour de Mutte, la ville fournit elle-même aux artisans une partie du fer nécessaire (*supra I.1.*).

L'origine du fer issu du procédé indirect est elle, en l'état, impossible à préciser. La seule indication figurant dans les comptes de construction est relative à l'envoi de deux messagers à « la forge d'Orval » pour aller chercher du fer (*supra*). À cette époque, l'abbaye d'Orval fait fonctionner, sur le territoire aujourd'hui lorrain, un établissement sidérurgique dans la petite vallée du Dorlon qui est alimenté par du minerai extrait des minières des bois de

⁶⁹ Les données les plus récentes sur cette question ont été publiées par Jockenhövel 2013, Myrstener *et al.* 2016. Un état des connaissances actualisé est présenté par Dillmann, L'Héritier 2016 .

⁷⁰ Hall 1983.

⁷¹ Gille 1970, Tylecote 1987, pp. 327-332.

Cosnes et de Saint-Pancré, dans le nord du Pays-Haut⁷². Or le minerai tiré de ces minières est du minerai de fer fort. De plus, l'abbaye peut aussi détenir d'autres établissements métallurgiques, notamment sur le territoire belge actuel, alimentés par d'autres minerais locaux.

Pour la ville de Metz, les sources d'approvisionnement en fer sont donc probablement multiples. Les relations commerciales attestées avec les pays rhénans et la région de Liège pourraient aussi y apporter des produits sidérurgiques⁷³. En Lorraine aussi, d'autres espaces sidérurgiques existent (le Barrois, le massif du Donon...), dans lesquels le procédé indirect pourrait être déjà actif à la fin du XV^e siècle⁷⁴. Au vu de la quantité de fer évoquée dans les comptes (plus d'une vingtaine de tonnes), il est raisonnable de penser que ce besoin n'a pu être satisfait par un unique centre de production régional.

4. Conclusion

Alors que l'utilisation du minerai sédimentaire de Lorraine, la minette, pour la production de fer brut est clairement démontrée par les recherches archéométallurgiques conduites depuis plusieurs années⁷⁵, c'est la première fois que l'emploi de pièces de fer forgé qui en sont issues est formellement attesté dans la construction d'un édifice de la fin du Moyen Age, en l'occurrence le principal monument de la plus grande ville lorraine de cette époque, la cathédrale Saint-Etienne de Metz. Ces crampons de scellement sont mis en œuvre au moins dès la phase terminale de la construction du fût de la tour méridionale, dans la seconde moitié du XIII^e siècle (achèvement vers 1280), érigée en beffroi municipal au XIV^e siècle, puis dans son couronnement en pierre édifié entre 1478 et 1483 pour abriter la cloche de la cité. La provenance du fer est donc d'origine relativement locale : une zone de production primaire, utilisant exclusivement ce minerai, est en effet attestée par les sources archéologiques et historiques sur le plateau des côtes de Moselle à une vingtaine de kilomètres au nord-ouest de la ville, dans la châtellenie de Briey appartenant au comté de Bar⁷⁶. Cet espace de production constitue pour ce dernier une source de revenu importante (affermage des coupes de bois et des « forges », droit sur l'eau). Mais à partir du dernier quart du XIII^e siècle et durant au moins tout le XIV^e siècle, le revenu de ces « forges » est engagé auprès de plusieurs grands bourgeois de la ville de Metz, devenus créanciers des comtes de Bar⁷⁷. On peut penser que, outre les revenus tirés des affermages, ces bourgeois tirent aussi profit de la vente du fer, même si les sources écrites ne le précisent pas. On peut donc émettre l'hypothèse qu'une partie du fer utilisé dans la cité, et notamment dans la construction, provient de cette zone de production. La démonstration établie par la présente étude vient donc apporter consistance à cette thèse. Toutefois, cette source d'approvisionnement n'est

⁷² En 1488, l'abbaye obtient du duc de Lorraine René II une exemption de droit de passage pour le minerai qui sortait de la prévôté ducale de Longwy où sont situés les minières de Cosnes et Saint-Pancré.

⁷³ Schneider 1950 p. 180.

⁷⁴ Les termes de « *fondresse* » ou « *fonderesse* » sont mentionnés pour Vaux, prévôté de Longwy (1445-1446), Morley et Saudrupt en Barrois (1458 et 1474), Belrupt en forêt de Darney (Vosges, 1495) et à même à Moyeuve en 1498. On rencontre le terme *d'affinerie* dans la seconde moitié du XV^e siècle, également à Morley (1468-1470), à Saudrupt (1474) et à Sexey dans le bassin de Nancy (1495).

⁷⁵ Leroy *et al.* 2015.

⁷⁶ Leroy *et al.* 2015, Horikoshi 2007.

⁷⁷ Schneider 1950.

sans doute pas la seule, comme l'atteste la référence figurant dans les comptes de construction du clocher pour l'année 1479 et mentionnant la fourniture de fer auprès de l'abbaye cistercienne d'Orval. Or celle-ci située à plus de 80 km au nord-ouest, sur l'actuelle frontière franco-belge, dispose d'établissements métallurgiques utilisant diverses sources de minerai de fer dans le nord de la Lorraine (minerai de fer fort) et dans le sud-est de la Belgique. Mais en l'état, et peut-être faute de référentiel géochimique suffisant, seuls des crampons de scellement associés à la signature chimique de la minette ont été identifiés. Les études à venir, avec notamment la multiplication d'analyses d'autres crampons, devront donc s'attacher à préciser ce point.

Par ailleurs, l'étude de ces crampons de scellement montre que les deux procédés techniques de production du fer brut, le procédé direct et le procédé indirect, sont employés concomitamment au sein de l'espace de production utilisant la minette, au moins jusque dans les dernières décennies du XV^e siècle, alors même que cette période correspond en Lorraine au début de la diffusion du procédé indirect. Mais celle-ci semble se faire principalement dans les secteurs géographiques où les ateliers utilisent un autre minerai que la minette (fer fort dans le Pays-Haut, minerai géodique dans le Barrois méridional). La permanence de l'emploi de fer forgé élaboré à partir de la minette en réduction directe dans la construction du clocher de la tour de Mutte à la fin du XV^e siècle vient ainsi confirmer les informations fournies par les recherches archéologiques sur les ateliers de production eux-mêmes, qui montrent que le procédé de production direct, avec ou sans utilisation de l'énergie hydraulique, semble rester prédominant, voire presque exclusif, dans les espaces utilisant la minette jusqu'au début de l'Époque moderne⁷⁸.

⁷⁸ Leroy *et al.* 2015.

Bibliographie

Belhoste 1996 : BELHOSTE J.-F., « Fabrication et mise en œuvre du fer dans la construction. Grandes étapes d'évolution (XIIIe-XIXe siècles) », *Monumental*, 13 1996, p. 9-17.

Calmon, Cenac 1994 : CALMON J.-C., CENAC J., « Laminage à froid des produits plats », *Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques*, Paris : Techniques de l'ingénieur, 1994, 28 p. (Mémoire 7950).

Chapelot, Benoit 1985 : CHAPELOT O., BENOIT P., éd., *Pierre et métal dans le bâtiment au Moyen Age*, Paris, EHESS, 1985, 370 p., réimpression, Paris, 2001.

Collet 2010 : Collet B., *La fortification de Troyes en Champagne : un grand chantier urbain fin XVe – première moitié du XVIe siècle*, Thèse de doctorat d'histoire sous la direction de J. Chapelot, EHESS, 2010.

Desaulty *et al.* 2009 : DESAULTY A.-M., DILLMANN Ph., L'HÉRITIER M., MARIET C., GRATUZE B., JORON J.-L., FLUZIN Ph., « Does it come from the Pays de Bray? Examination of an origin hypothesis for the ferrous reinforcements used in French medieval churches using major and trace element analyses », *Journal of Archaeological Science*, 36, 2009, p. 2445-2462.

Dillmann 2009: DILLMANN Ph., « De Soissons à Beauvais : le fer des cathédrales de Picardie, une approche archéométrique », dans TIMBERT A. (dir.), *L'Homme et la Matière : l'emploi du plomb et du fer dans l'architecture gothique*, Paris, Picard, 2009, p. 93-112.

Dillmann, L'Héritier 2007 : DILLMANN Ph., L'HERITIER M., « 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. 1810-1823.

Dillmann, L'Héritier 2016 : DILLMANN Ph., L'HERITIER M., « Archéométrie et histoire des techniques : les procédés direct et indirect en sidérurgie (XIV^e-XVII^e siècles) », *Artefact*, 4, *L'Europe technicienne XVe-XVIIIe siècle*, 2016, p. 63-81.

Disser 2014: DISSER A., *Production et circulation du fer en Lorraine (VI^e s. av. J.-C. - XV^e s. ap. J.-C.)*, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Belfort, 2014.

Disser *et al.* 2014 : DISSER A., DILLMANN P., BOURGAIN C., L'HÉRITIER M., VEGA E., BAUVAIS S., LEROY M., « Iron reinforcements in Beauvais and Metz Cathedrals : from bloomery or finery ? The use of logistic regression for differentiating smelting processes », *Journal of Archaeological Science*, 42, 2014, p. 315-333.

Disser *et al.* 2016 : DISSER A., DILLMANN Ph., LEROY M., L'HÉRITIER M., BAUVAIS S., FLUZIN Ph., « Iron supply for the building of Metz Cathedral : new methodological development for provenance studies and historical considerations », *Archaeometry*, 2016, édition électronique, University of Oxford, 18 p.

Erlande-Brandenburg 1996 : ERLANDE-BRANDEBURG E., « L'architecture rayonnante et le métal », *Dossiers d'archéologie*, n°219, déc. 1996 - janv. 1997, p. 46-53.

Pagès, L'Héritier 2015 : Pagès G., L'Héritier M., « La circulation du fer sous ses formes brutes dans la Gaule antique et la France médiévale à travers l'analyse archéométallurgique des vestiges archéologiques », dans D. Boisseuil et C. Rico, dir., *Le marché des matières premières dans l'Antiquité et au Moyen Âge (2) : La circulation des matières premières : routes, moyens, acteurs*, Casa de Velasquez, 2015,

https://www.casadevelazquez.org/fileadmin/fichiers/investigacion/Programmes_pluriannuels/ERMO/Resume-Pages-L_Heritier-MMP-2014.pdf

Gille 1970 : GILLE B., « L'évolution de la technique sidérurgique. Esquisse d'un schéma », *Revue d'histoire des mines et de la métallurgie*, II, 2, Nancy, 1970, p. 121-226.

- Girardot 1970 : GIRARDOT A., « Forges princières et forges monastiques, coup d'oeil sur la sidérurgie lorraine aux XII^e et XIII^e siècles », *Revue d'histoire des mines et de la métallurgie*, II, 1, Nancy, 1970, p. 3-20.
- Girardot 1986 : GIRARDOT A., « La République messine », Le Moigne F.-Y. dir., *Histoire de Metz*, Privat, Toulouse, 1986, p. 137-166.
- Hall 1983: HALL B. S., « Cast iron in late medieval Europe : a re-examination », *Canadian institut of mining and metallurgy bulletin*, 76, 855, 1983, p. 86-91.
- Horikoshi 2007: HORIKOSHI K., *L'industrie du fer en Lorraine, XII^e - XVII^e siècles*, Ed. Dominique Guénot, Langres, 2007, 515 p.
- Jacob 1864 : JACOB V., *Recherches historiques sur le tour et la cloche de Mutte de la cathédrale de Metz*, Metz, 1864.
- Jockenhövel 2013 : JOCKENHOVEL A., *Mittelalterliche Eisengewinnung im Märkischen Sauerland: archäometallurgische Untersuchungen zu den Anfängen der Hochofentechnologie in Europa*, Rahden, Verlag Marie Leidorf, 2013, 419 p.
- Lardin 1998 : Lardin Ph., *Les chantiers du bâtiment en Normandie orientale (XIV^e-XVI^e siècle). Les matériaux et les hommes*, Lille, Presses universitaires du Septentrion, 1998.
- L'Héritier 2007 : L'Héritier M., *L'utilisation du fer dans l'architecture gothique: les cas de Troyes et de Rouen*, Thèse de doctorat d'archéologie sous la direction de P. Benoit, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I, 2007.
- L'Héritier et al. 2005 : L'HÉRITIER M., JUHIN A., DILLMANN Ph., ARANDA R., BENOIT P., « Utilisation des alliages ferreux dans la construction monumentale du Moyen Age. Etat des lieux de l'avancement des études métallographiques et archéométriques », *Archéosciences, Revue d'archéométrie*, 29, 2005 pp. 117-132.
- L'Héritier et al. 2007 : L'HÉRITIER M., DILLMANN Ph., BENOIT P., « L'emploi du fer dans la construction monumentale à la fin du Moyen-Age : production et utilisation », *4^e congrès international d'archéologie médiévale et moderne Medieval Europe Paris 2007 : l'Europe en mouvement*, Paris, INHA, septembre 2007 (édition électronique Internet : medieval-europe-paris-2007.univ-paris1.fr), 18 p.
- L'Héritier et al. 2010 : L'HÉRITIER M., DILLMANN Ph., BENOIT P., « Iron in the building of gothic churches: its role, origins and production using evidence from Rouen and Troyes », *Historical Metallurgy*, 44(1), 2010, p. 21-35.
- L'Héritier, Dillmann, 2011 : L'HÉRITIER M., DILLMANN Ph., « Fer ou acier ? Caractérisation des alliages ferreux utilisés dans la construction des églises gothiques au Moyen Age et à la période moderne. L'exemple de Troyes et de Rouen », DILLMANN Ph., PEREZ L., VERNA C. éd., *L'acier en Europe avant Bessemer*, CNRS / Université de Toulouse-Le-Mirail (Histoires et Techniques), Méridiennes, 2011, p. 263-281.
- L'Héritier et al. 2013 : L'HÉRITIER M., DILLMANN Ph., AUMARD S., FLUZIN Ph., « Iron ? Which Iron ? Methodologies for Metallographic and Slag Inclusion Studies », HUMPHRIS J., REHREN T., dir., *The World of Iron*, proceedings of international conference, 16-20 february 2009, London : Archetype editions, 2013, p. 409-420.
- L'Héritier et al. 2016 : L'HÉRITIER M., ARLES A., DISSER A., GRATUZE B., « Lead it be! Identifying the construction phases of gothic cathedrals using lead analysis by LA-ICP-MS », *Journal of Archaeological Science: Reports* 6, 2016, p. 252–265.
- Leroy M. 1997 : LEROY M., *La sidérurgie en Lorraine avant le haut fourneau. L'utilisation du minerai oolithique en réduction directe*, Monographie du CRA, 18, Paris : CNRS Editions, 1997, 310 p.
- Leroy M. et al. 2015 : LEROY M., MERLUZZO P. LE CARLIER C., *Archéologie du fer en Lorraine. Minette et production du fer en bas fourneaux dans l'Antiquité et au Moyen Age*, Fensch Vallée Editions, Knutange, 2015, 372 p.

Leroy S. *et al.* 2012 : LEROY S., COHEN S.X., VERNA C., GRATUZE B., TEREYGEOL F., FLUZIN Ph., BERTRAND L., DILLMANN Ph., « The medieval iron market in Ariège (France). Multidisciplinary analytical approach and multivariate analyses », *Journal of Archaeological Science*, **39**, 2012, p. 1080-1093.

Leroy S. *et al.* 2015 : LEROY S., L'HERITIER M., DELQUE-KOLIC E., DUMOULIN J.-P., MOREAU Ch., DILLMANN Ph., « Consolidation or initial design? Radiocarbon dating of ancient iron alloys sheds light on the reinforcements of French gothic cathedrals », *Journal of Archaeological Science*, **53**, 2015, p. 190-201.

Maggi *et al.* 2012 : MAGGI Chr., PAGÈS G., MERTENS A., HOFFSUMMER P., « 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 siècles », *ArchéoSciences, Revue d'archéométrie*, **36**, 2012, pp. 95-115.

Mertens *et al.* 2009 : MERTENS A., MATHIS F., DILLMANN Ph., HOFFSUMMER P., « Emergence du procédé indirect d'élaboration du fer en région liégeoise : apport d'une étude technique de fers de charpentes dates par dendrochronologie », *Chimie nouvelle*, **101**, 2009, p. 24-28.

Myrstener *et al.* 2016 : MYRSTENER E., LIDBERG W., SEGERSTRÖM U., BIESTER H., DAMELL D., BINDLER R., « Was Moshyttan the earliest iron blast furnace in Sweden? The sediment record as an archeological toolbox », *Journal of Archaeological Science : Reports*, vol. **5**, 2016, p. 35-44.

Neff, Dillmann 2001 : NEFF D., DILLMANN Ph., « Phosphorus localisation and quantification in archaeological iron artefacts micro-PIXE microanalyses », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **181**, 2001, p. 675-680.

Pagès *et al.* 2008 : PAGÈS G., LONG L., FLUZIN Ph., DILLMANN Ph., « Réseaux de production et standards de commercialisation du fer antique en Méditerranée : les demi-produits des épaves romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône) », *Revue Archéologique de Narbonnaise*, **41**, 2008, p. 261-283.

Schneider 1950 : SCHNEIDER J., *La ville de Metz aux XIII^e et XIV^e siècles*, Nancy, imprimerie Georges Thomas, 1950, 606 p.

Stewart *et al.* 2000 : 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*, **16**, 2000, p. 275-282.

Taupin 1996 : TAUPIN J.-L., « La cathédrale de Bourges et l'utilisation du fer dans l'architecture », *Bulletin Monumental*, 1996, p. 129-148.

Tylecote 1987 : TYLECOTE R. F., *The early history of metallurgy in Europe*, Longman Archaeology Series, London, 1987, 391 p.

Vega *et al.* 2003 : VEGA E., DILLMANN Ph., L'HERITIER M., FLUZIN Ph., CREW P., BENOIT P., « Forging of phosphoric iron. An analytical and experimental approach », *Archaeometallurgy in Europe. Proceedings of the International Conference of Milano*, 2003, Milano : Associazione Italiana di Metallurgia, 2003, p. 337-346.

Villes 2004 : VILLES A., « Remarques sur les campagnes de construction de la cathédrale de Metz au XIII^e siècle », *Bulletin Monumental*, **162**, **4**, 2004. pp. 243-272.

Figures

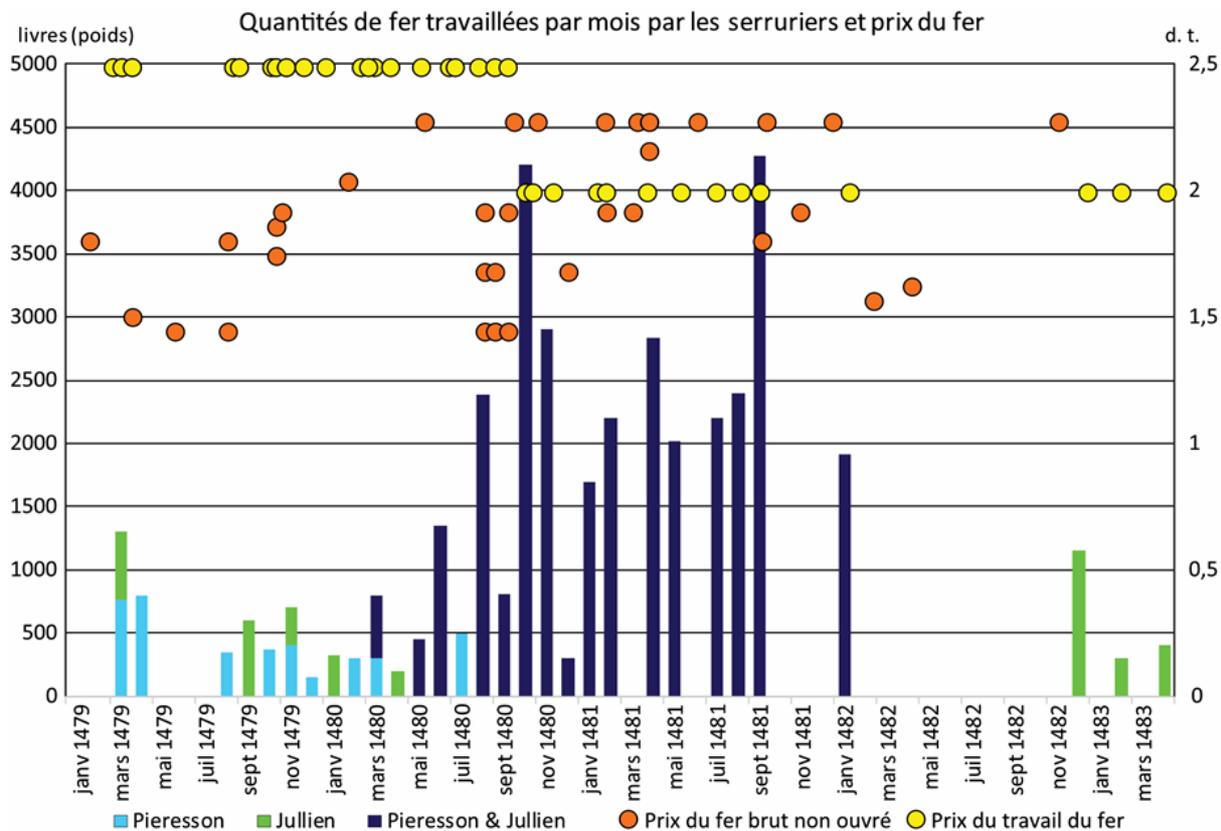


Figure 1 : Quantités de fer achetées par la ville de Metz pour le chantier de la tour de Mutte entre janvier 1479 et décembre 1483.

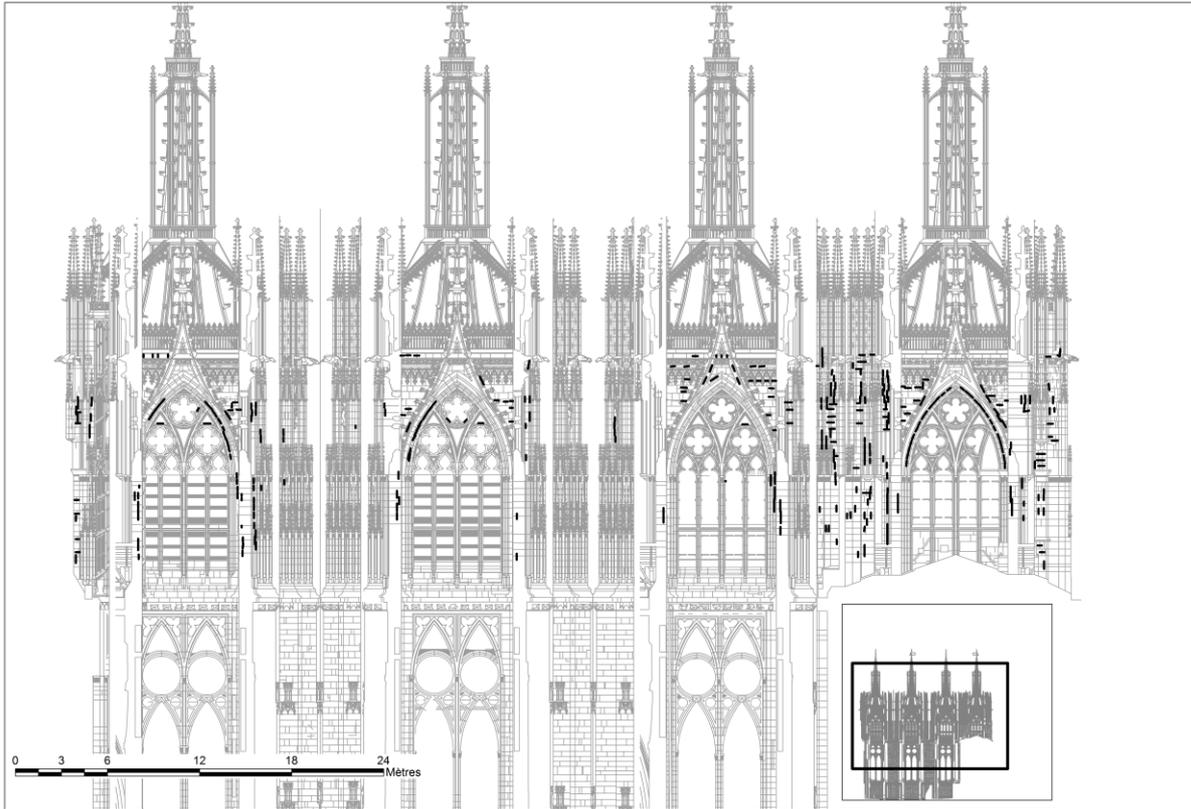


Figure 2 : Emplacement des crampons prélevés sur les façades externes de la tour de Mutte.

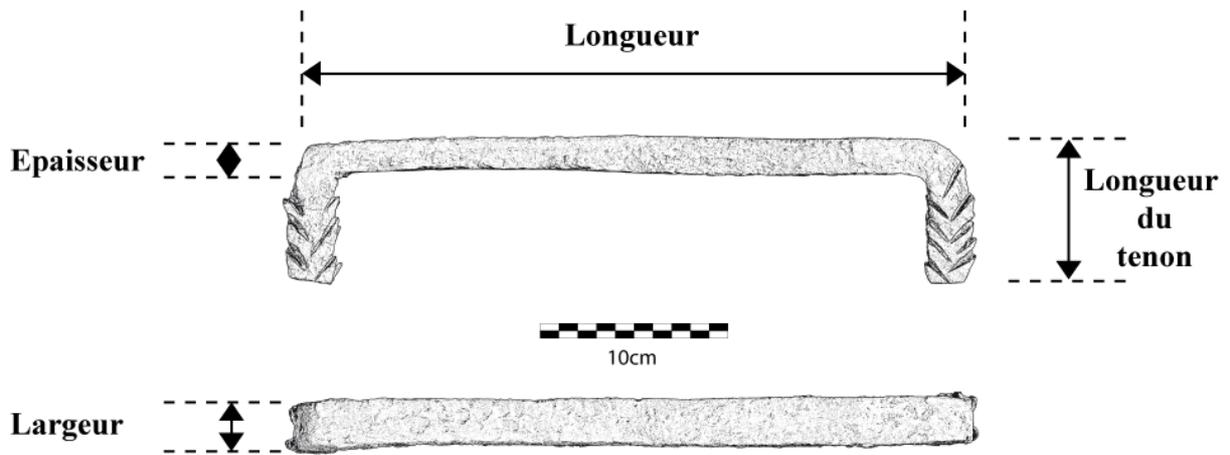


Figure 3 : Mesures prises pour caractériser les dimensions des éléments de renfort ferreux.

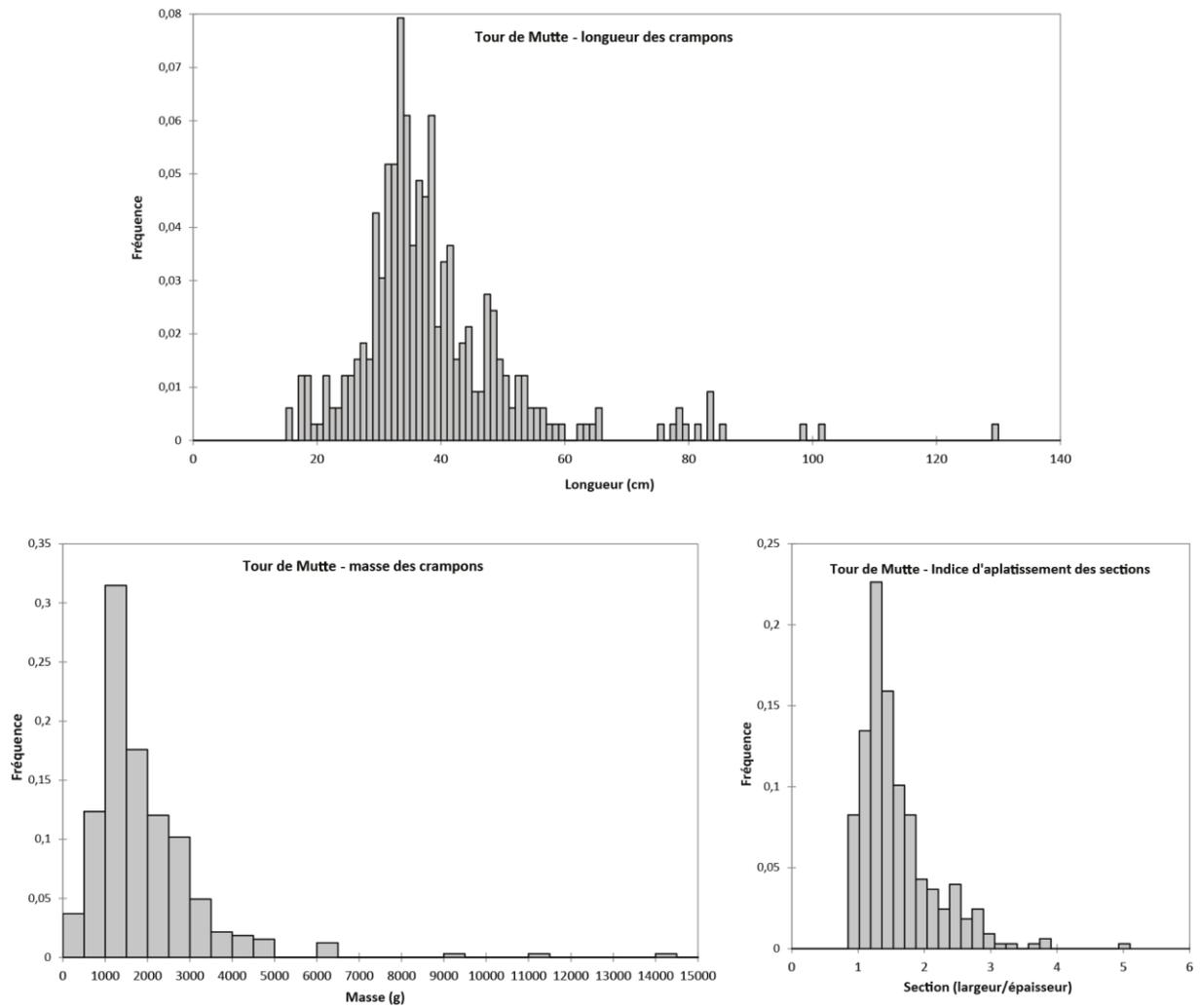


Figure 4 : Distributions des longueurs, masses et rapports d'aplatissement des crampons prélevés.

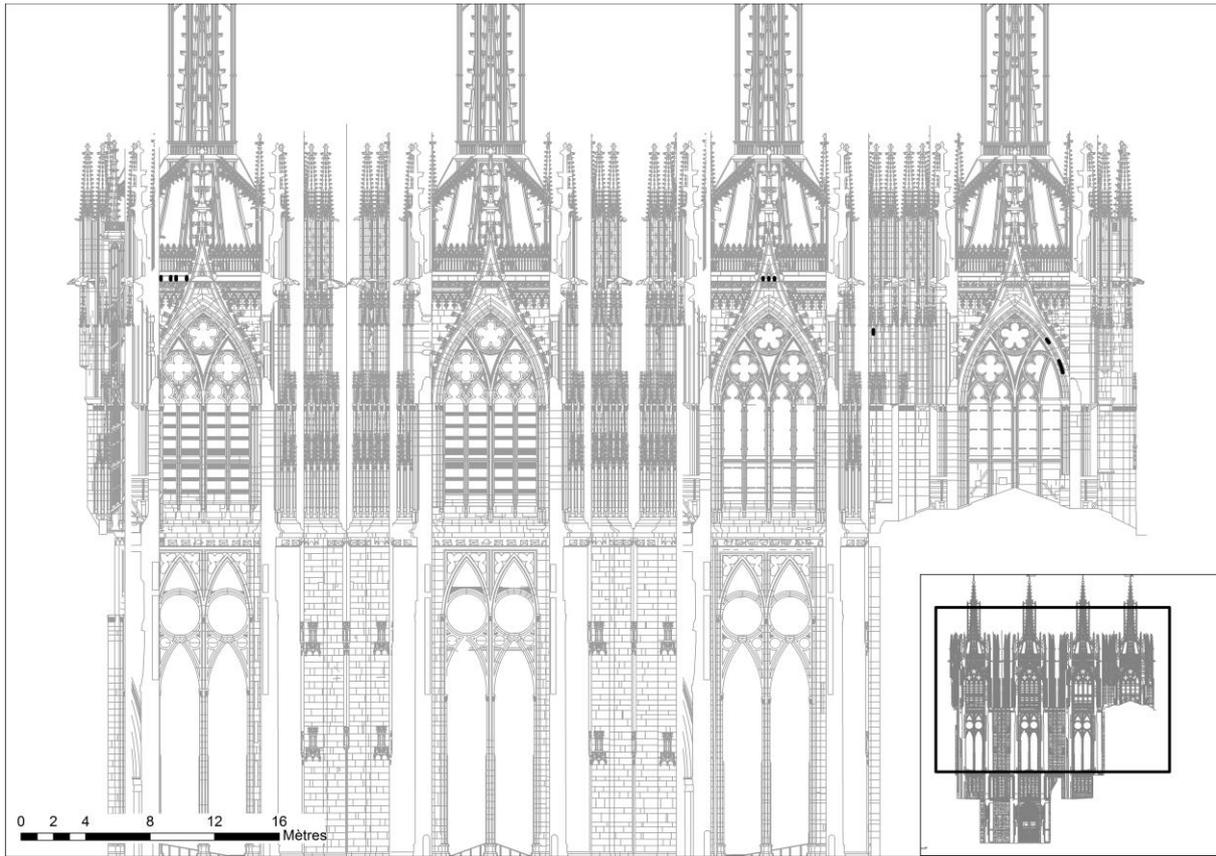


Figure 5 : Emplacement des crampons à tenons en forme de torsades.

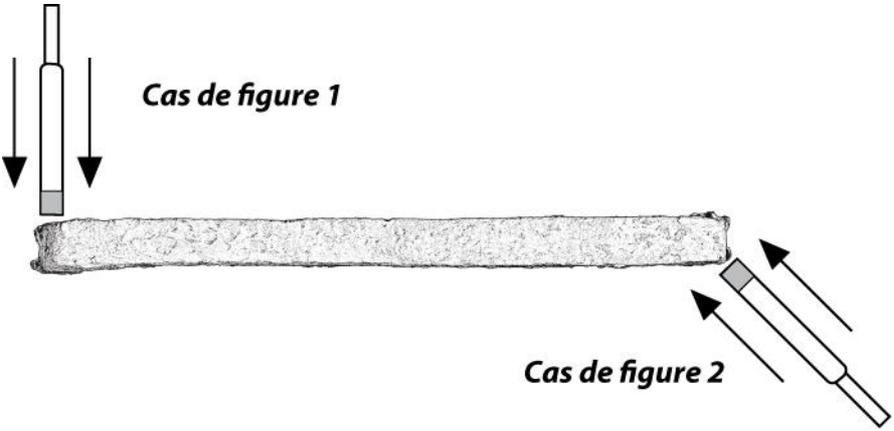


Figure 6 : Méthodes d'impression des crans sur les tenons des crampons prélevés.

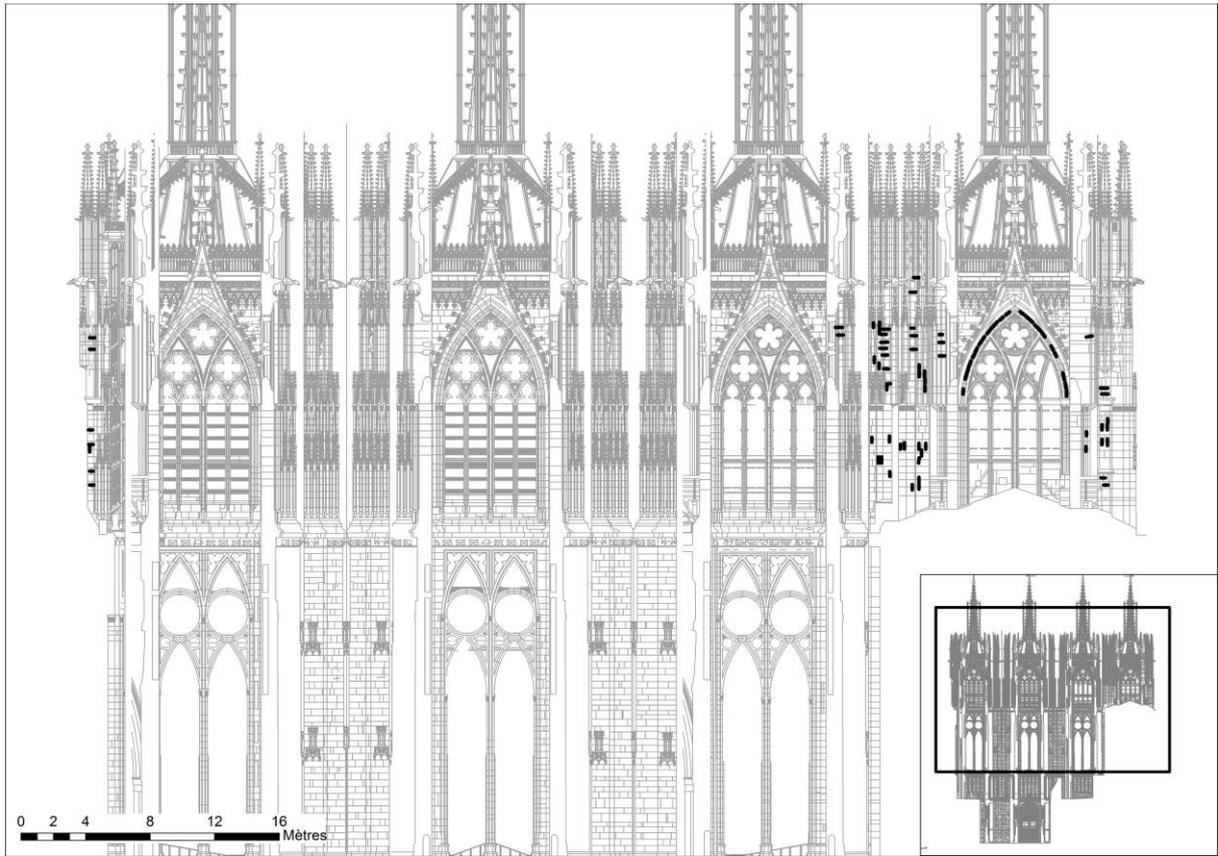


Figure 7 : Emplacement des crampons à tenons crantés à la fois sur leurs faces externes et internes.

MUT56N12

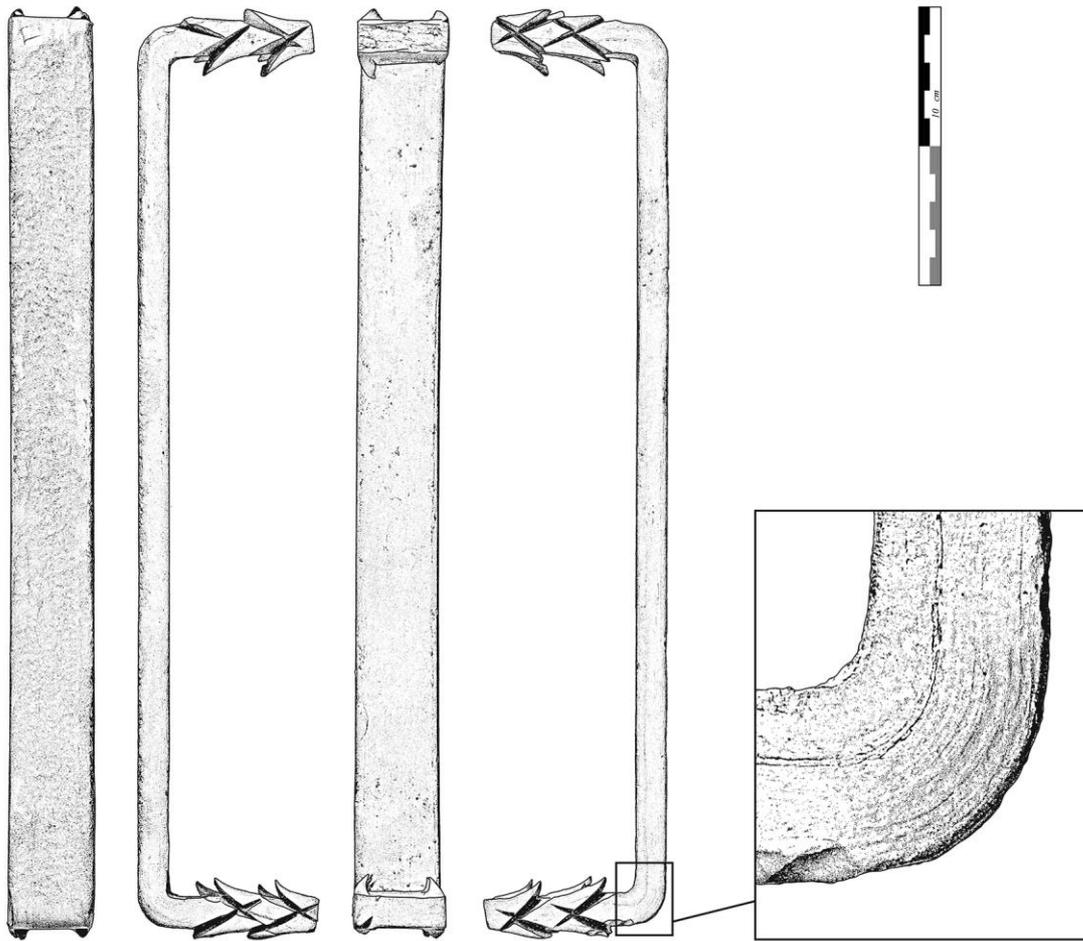


Figure 8 : Crampon formé par laminage.

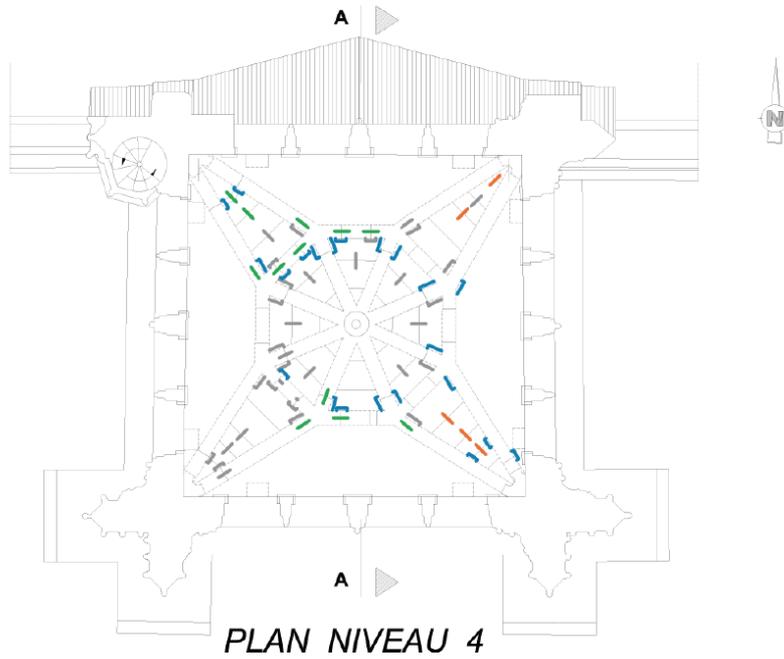
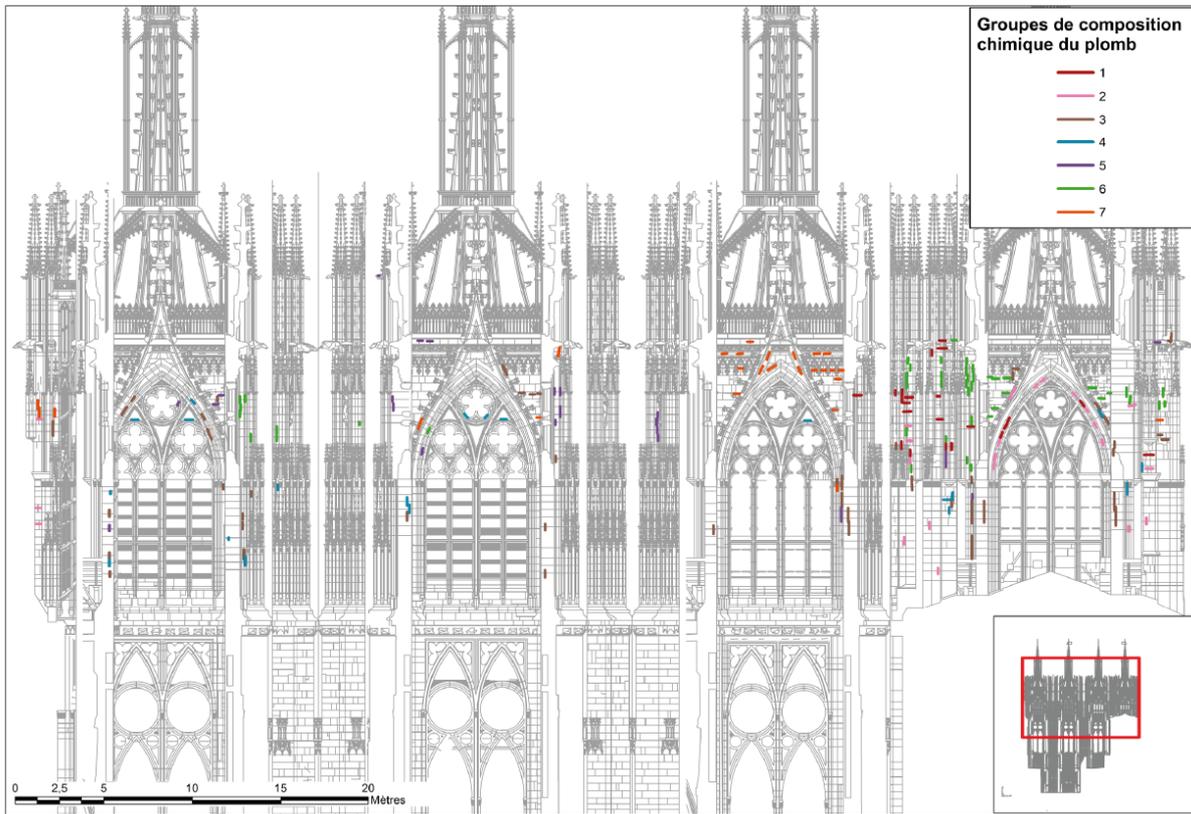


Figure 9 : Répartition des groupes de composition chimique des plombs de scellement prélevés sur les façades externes de la tour (en haut) et de la voûte de la salle de la cloche (en bas).

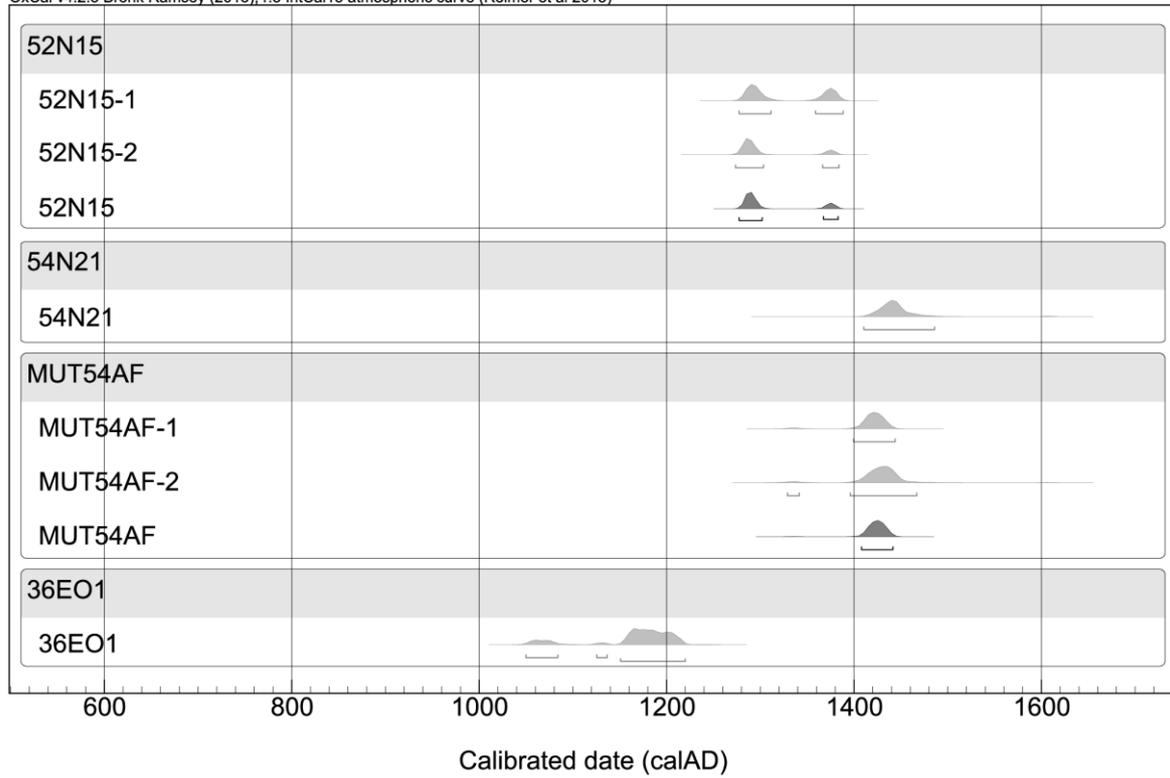


Figure 10 : Résultats calibrés des datations radiocarbone effectuées sur une sélection de crampons.

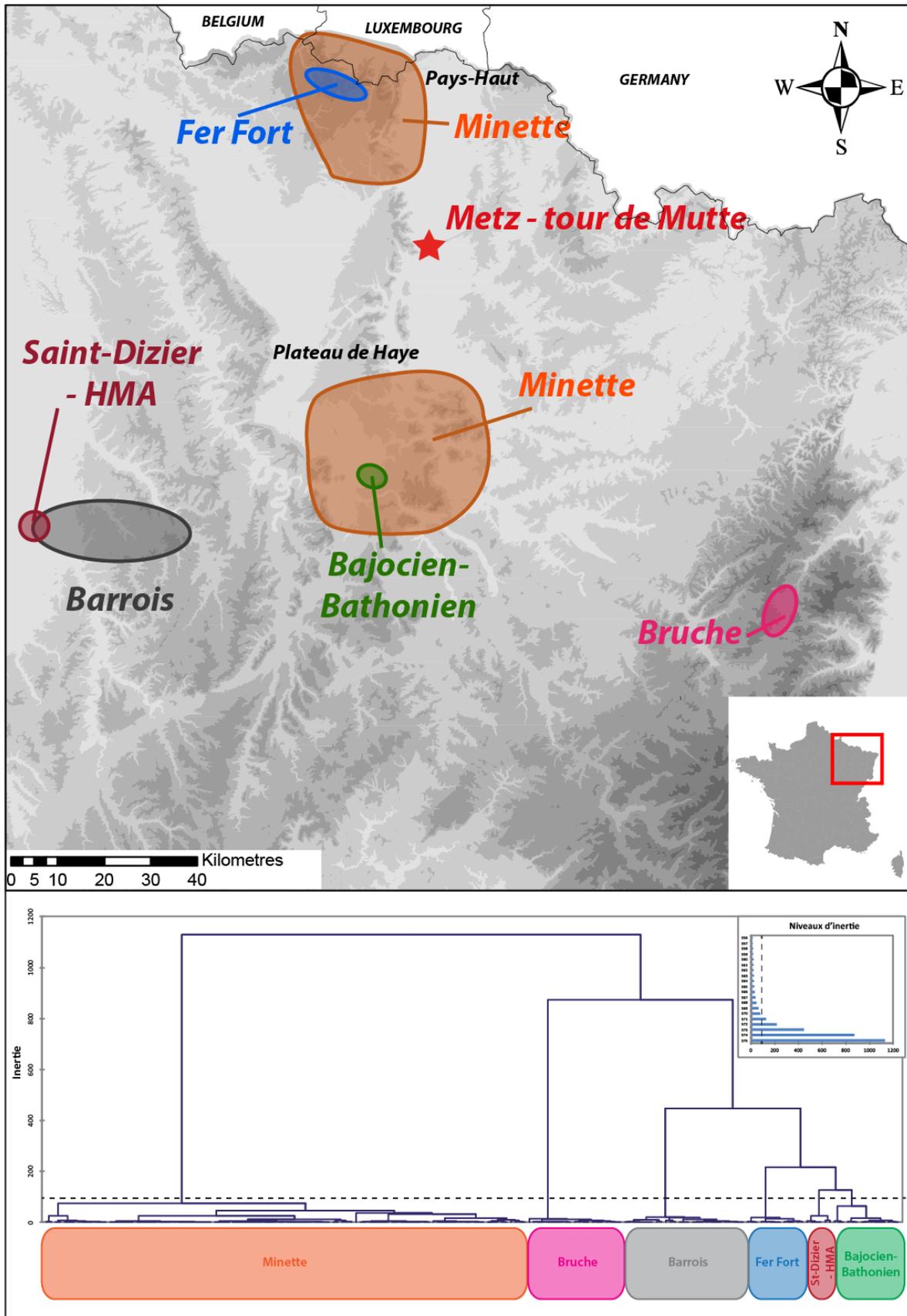


Figure 11 : En bas : résultats d'une classification ascendante hiérarchique définissant des ensembles géochimiques cohérents au sein du référentiel lorrain. En haut : extension géographique approximative des ensembles géochimiques constitués.

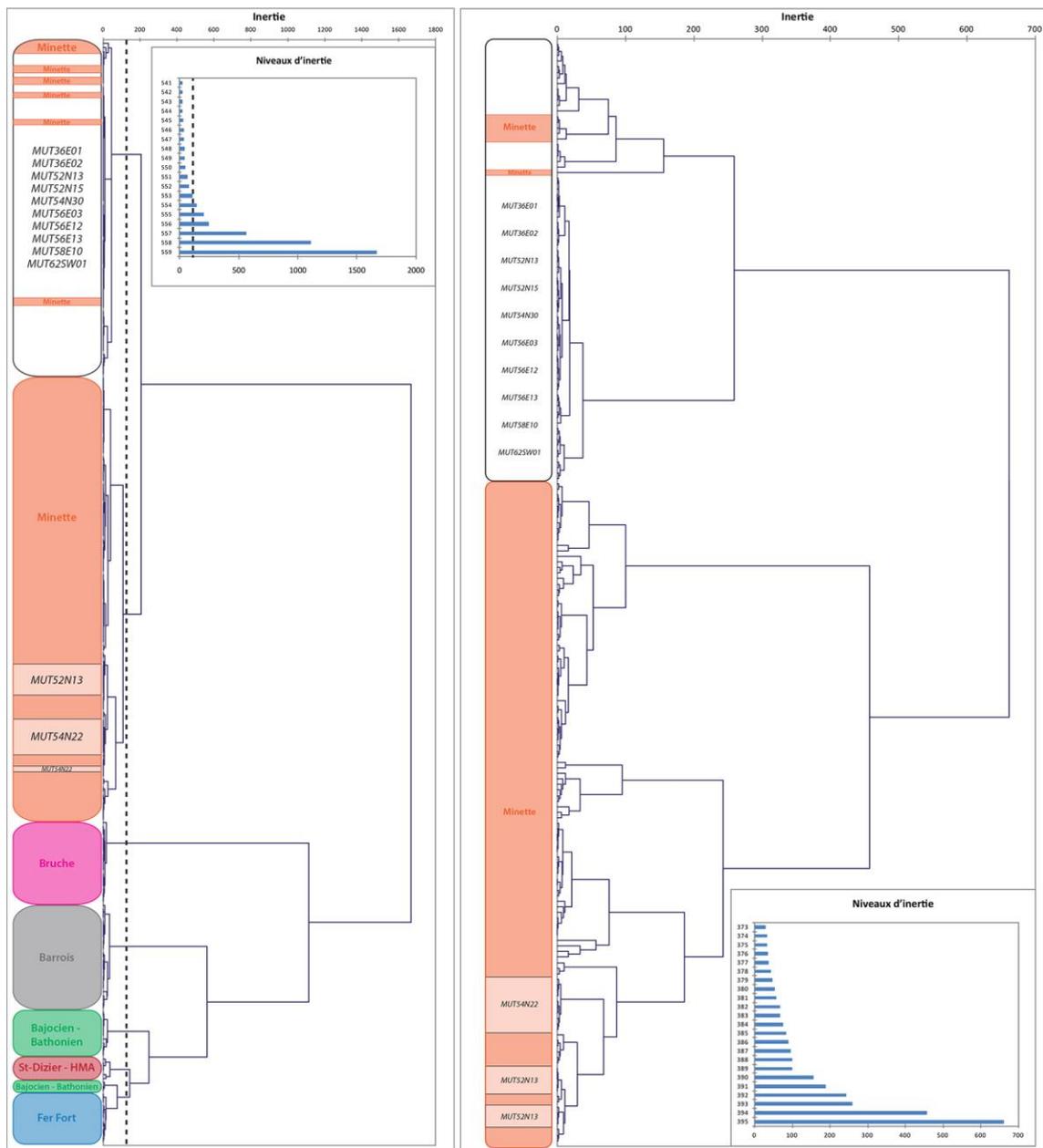


Figure 12 : A gauche : résultats d'une classification ascendante hiérarchique réalisée à la fois sur les ensembles géochimiques lorrains et les inclusions des onze renforts analysés issus du procédé direct. A droite : résultats d'une classification ascendante hiérarchique réalisée sur l'ensemble de production associé à l'utilisation du minerai oolithique aalénien (minette) et les inclusions des onze renforts analysés issus du procédé direct.

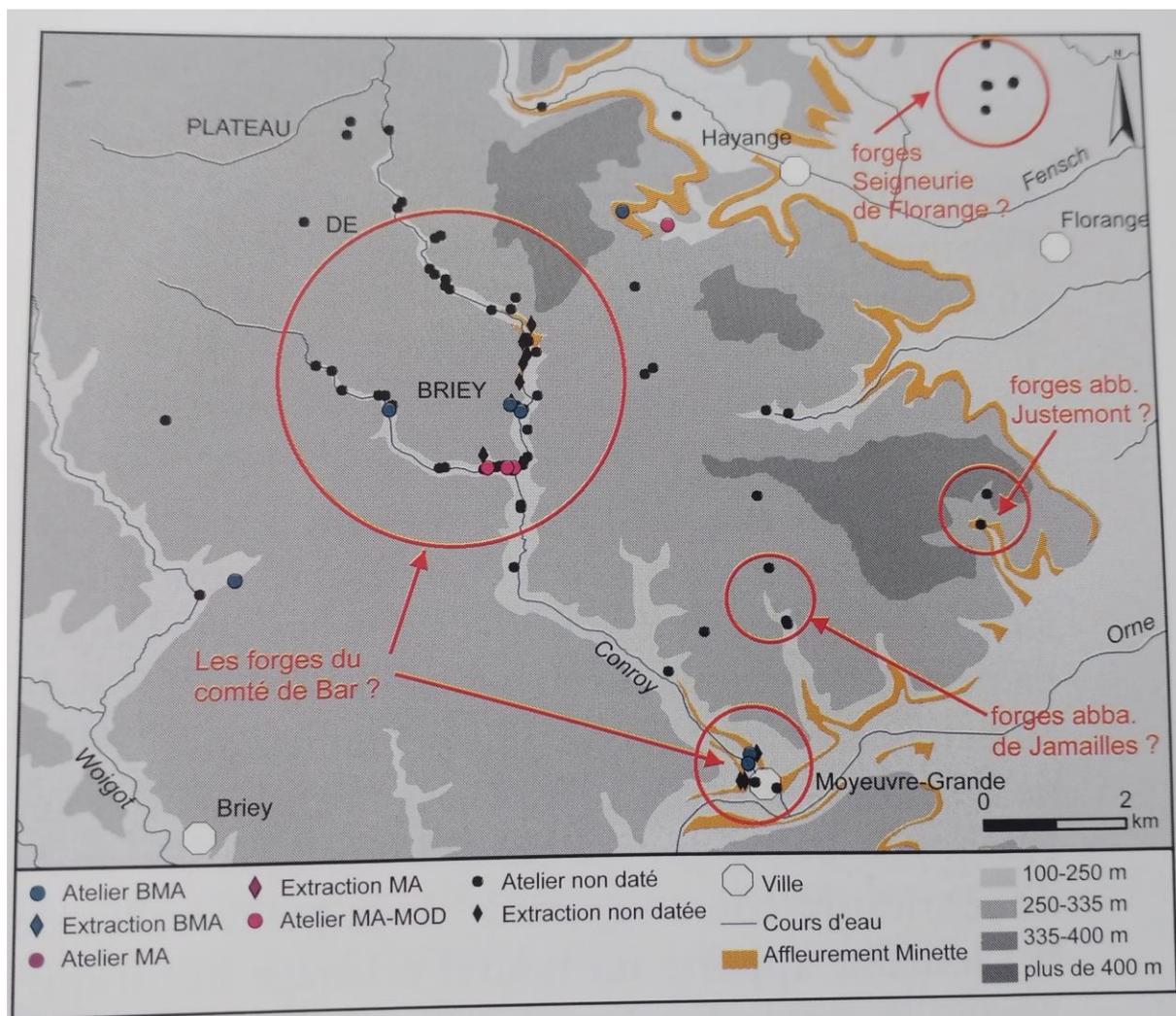


Figure 13 : Vestiges archéologiques d'ateliers de production du fer et de sites d'extraction minière datés de la fin du Moyen Age et du début de l'Epoque moderne (XIII^e - XVI^e s.) en Lorraine centrale et septentrionale. Plusieurs ensembles pourraient correspondre aux espaces de production mentionnés dans les sources écrites (cartographie Marc Leroy).