

Le chantier de la tour de Mutte à Metz : regards sur la production du fer en Lorraine à la fin du Moyen Âge. Fouille de données, analyses prédictives et traitement spatial des données.

Title: The building of the Mutte tower in Metz : perspectives on iron production in Lorraine during late Middle Age. Data mining, predictive analyses and spatial data treatment

Alexandre Disser¹, Maxime L'Héritier², Philippe Dillmann¹ et Adrien Arles³

Résumé : La construction du beffroi de la ville de Metz (Moselle, France), entre 1478 et 1483, a nécessité l'utilisation de plusieurs centaines de renforts ferreux afin de contribuer à la cohésion de la maçonnerie. Ce chantier se déroule à un moment particulier de l'histoire de la sidérurgie européenne, marqué par la diffusion du procédé indirect. Cette filière technique est adoptée graduellement par les producteurs de métal, définissant un panorama sidérurgique particulièrement riche et varié, dont l'étude enrichit notre perception de l'histoire de l'économie et des techniques métallurgiques. Une étude archéométrique extensive a été réalisée sur les renforts et leurs scellements en plomb afin de déterminer les origines technique et géographique du fer utilisé. L'exploitation des données chimiques obtenues a nécessité l'utilisation de plusieurs analyses statistiques multivariées afin de mieux comprendre l'histoire de l'édifice, d'évaluer l'importance du fer produit par procédé indirect sur les marchés du fer lorrains de la fin du Moyen Âge, et d'identifier les acteurs sidérurgiques engagés dans l'approvisionnement des réseaux d'échange. Cet article présente les étapes successives de l'étude réalisée, en détaillant pour chacune les facteurs qui ont motivé le recours à différentes analyses statistiques multivariées (analyse en composantes principales, classification ascendante hiérarchique, régression logistique), ainsi que les principaux résultats obtenus.

Abstract: The building of the belfry of Metz (Lorraine, France), which took place between 1478 and 1483, necessitated the implementation of hundreds of ferrous reinforcements to contribute to the cohesion of the masonry. This building yard took place at a particular time in the history of the European siderurgy, marked by the diffusion of the finery process. This technical innovation has been gradually adopted par iron producers, drawing up a particularly rich and diverse panorama, whose study enriches our knowledge of the history of metallurgical techniques and economy. An extensive archaeometrical study was carried out on the reinforcements and their lead sealings in order to determine the technical and geographical origins of the iron. The processing of the chemical data that was obtained required the use of several multivariate statistical analyses to better understand the chronology of the monument, to evaluate the importance of the finery process in the supply of the iron markets set up in late medieval Lorraine, and to identify the iron producers involved in providing the exchange networks. This paper presents the successive stages of the study, by detailing for each step the factors that have required the use of different multivariate statistical analyses (principal component analysis, hierarchical clustering, logistic regression), as well as the major results obtained.

¹ Laboratoire Archéomatériaux et Préviation de l'Altération (LAPA), IRAMAT LMC UMR 5060 CNRS, et NIMBE UMR 3685 CEA/CNRS, CEA/Saclay 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France.

E-mail : alexandre.disser@cea.fr

² Université Paris 8, EA 1571, Centre de Recherches Historiques : Histoire des Pouvoirs, Savoirs et Sociétés, 2 rue de la Liberté, 93526 Saint-Denis cedex, France.

³ Arkemine, Recherche & Archéologie Préventive, Beaumont-les-Valence, France.

Mots-clés : analyses multivariées, fouille de données, archéoméallurgie, histoire des techniques, architecture gothique

Keywords: multivariate analyses, datamining, archaeometallurgy, history of technology, gothic architecture

Classification AMS 2000 : 62H30,62H30

1. Introduction

Chaînages, tirants, agrafes, armatures de vitraux, l'importance de l'usage du fer dans l'architecture médiévale n'est plus à démontrer (L'Héritier, 2007; L'Héritier *et al.*, 2010; Taupin, J.-L., 1996; Timbert, 2009). Parfois intégré à la construction originelle ou encore rajouté a posteriori comme consolidation, en cours de chantier ou plusieurs siècles après son achèvement, les questions liées à son rôle structurel dans la maçonnerie ont déjà fait l'objet d'un grand nombre de travaux (Leroy *et al.*, 2015b; L'Héritier *et al.*, 2012). Mais cet usage du fer dans l'architecture médiévale ne se limite pas aux seules problématiques constructives. Il pose également la question de l'approvisionnement du chantier et en particulier la provenance du matériau, en fonction des époques, de ses ressources et de ses besoins. Ces grands chantiers de construction, où plusieurs tonnes de métal peuvent parfois être acheminées au cours d'une seule année (Bernardi et Dillmann, 2005, 2002; L'Héritier *et al.*, 2010), constituent des sites de consommation par excellence qui font partie intégrante du marché du fer à l'époque médiévale.

Le monument se mue ainsi en observatoire pour étudier les productions métallurgiques, ce qui revêt un intérêt particulier pour la fin du Moyen Âge, période d'importants changements techniques dans les filières de production du fer. L'introduction dès le XIV^e siècle en Wallonie de la filière de réduction indirecte en hauts fourneaux et affinerie (Awty, 2007; Gillard, 1971), qui supplante progressivement l'ancien procédé direct en bas fourneaux est une des évolutions techniques marquantes de la fin du Moyen Âge.

La tour de Mutte de la cathédrale de Metz est au cœur de ces problématiques. Érigée entre le XIII^e et le XV^e siècle, elle a fait un abondant usage du métal tout au long de sa construction, en particulier à la fin du XV^e siècle, où, d'après les sources comptables, près de 23 tonnes de fer furent employées à l'ouvrage (Jacob, 1864, p. 37). Sa période de construction englobe donc celle de ces changements techniques sans précédent dans le domaine de la métallurgie. En outre, la question de la production du fer aux époques historiques en Lorraine a déjà fait l'objet de recherches archéologiques, qui ont mis en évidence l'exploitation concomitante de plusieurs types de minerais de fer, parmi lesquels la Minette Lorraine, un minerai sédimentaire et le fer fort, un minerai sidérolithique (Casarotto *et al.*, 1996; Deffressigne *et al.*, 2002; Leroy, 1997; Leroy *et al.*, 2015a; Leroy et Merluzzo, 1998; Leypold, 1996). On sait d'ailleurs qu'à la fin du XIII^e siècle, les paraiges de la ville entretiennent des liens avec des autorités locales qui produisent du fer et contrôlent même une partie des forges du comté de Bar (Girardot, 1970; Schneider, Jean, 1950). Au XV^e siècle, l'oligarchie messine finance toujours le chantier de la tour, qui s'approvisionne en fer brut, sans passer par des marchands ou des forgerons de la ville, chose rare pour un grand chantier de construction urbain. L'origine précise du métal n'est toutefois pas connue, à l'exception d'une unique mention de la forge d'Orval (Arch. Mun. Metz, DD 20, fol 25 v^o). Ainsi, déterminer la provenance des renforts de fer de la tour de Mutte permettrait à la fois d'éclairer l'évolution de l'organisation de la production du fer en Lorraine au bas Moyen Âge à une période clef de transitions technologiques, mais aussi de renseigner l'importance des réseaux de pouvoir quant à l'approvisionnement de ce matériau stratégique.

Ces questionnements spécifiques liés à la métallurgie ancienne, abordés auparavant par les seules sources historiques et archéologiques, bénéficient de récentes avancées faites dans le domaine de l'archéométrie. Ces développements, reposant sur l'utilisation de méthodes d'investigation physico-chimique des matériaux archéologiques, ont ouvert un nouveau champ de perspectives pour l'étude des systèmes techniques et économiques anciens. L'interprétation des données chimiques acquises par ce biais, ainsi que leur mise en adéquation avec les modèles théoriques relatifs aux systèmes techniques anciens ont fait l'objet de nombreuses publications (Fluzin, 2002, 1983; Leroy, 1997; Mangin, 1993; Pleiner, 2000; Serneels, 1993). L'emploi de ces méthodes a par ailleurs fait émerger de nouveaux besoins, notamment du point de vue du traitement de l'information chimique. Les études récentes réalisées dans ce domaine se sont appliquées à adapter différentes analyses statistiques multivariées aux données chimiques collectées. Les travaux réalisés sur la tour de Mutte, cherchant à répondre à des questions variées (chronologie relative de mise en œuvre des renforts métalliques, distinction des procédés sidérurgiques, provenance des matériaux), constituent en ce sens un exemple particulièrement illustratif de cette adaptation. Les réflexions menées en termes de préparation des données, datamining et inférence statistique font l'objet du présent article. Les résultats issus de ces approches ont été intégrés à un Système d'Information Géographique propre au bâtiment, offrant la possibilité d'interpréter spatialement les résultats des analyses multivariées. Ces méthodes de traitement de l'information se sont révélées indispensables à une meilleure compréhension des modalités d'utilisation du métal par les chantiers de construction et de restauration successifs.

La tour de Mutte est le beffroi de la cité de Metz. Accolée au sud de la cathédrale, elle appartient à la ville et abrite depuis la fin du XIV^e siècle la Mutte, le bourdon de la cité qui lui a donné son nom. L'élévation des premiers étages de la tour remonte au milieu du XIII^e siècle, parallèlement à la réédification de la cathédrale gothique à partir de 1220. Jusqu'à environ 44 m de hauteur, ces premiers étages sont en pierre de taille. Ils sont coiffés d'un « nouveau beffroi de bois » à partir de 1381. Incendié en 1468, il est peu de temps après remplacé par une construction de pierre surmontée d'une flèche. Les travaux s'étalent de 1478 à 1483 (Jacob, 1864). Les comptabilités conservées pour cette période mentionnent la mise en œuvre de près de 23 tonnes de fer, scellées par près de 7 tonnes de plomb, dans la structure du dernier étage de la tour et de la flèche. La tour a subi de nombreux dommages dans les siècles suivants, ayant pour conséquence l'ajout de nombreuses armatures pour consolider sa structure. Citons en particulier les aménagements de 1870, qui virent l'ajout de renforts de fer dans les parties hautes de la cathédrale. Quelques années plus tard, l'incendie de 1877, consécutif à un feu d'artifice en l'honneur de l'empereur Guillaume I, tiré à partir de la toiture même de la cathédrale (Kuhn-Mutter, 1994), endommagea gravement la face nord de la tour de Mutte. D'importantes restaurations furent ainsi nécessaires dans les années 1880. La flèche fut finalement reconstruite en 1909. Sans compter les restaurations actuelles, les renforts de fer – essentiellement des agrafes¹ - mis en œuvre dans la maçonnerie de la tour de Mutte s'étalent donc sur une période de près de sept siècles, entre le milieu du XIII^e siècle et le début du XX^e siècle.

¹ Plusieurs types de pièces métalliques, parmi lesquels tirants, goujons et agrafes, sont employés pour renforcer la maçonnerie. Les agrafes, barres métalliques munies à leurs extrémités de deux tenons, composent la catégorie la mieux représentée sur la tour de Mutte.

2. Constitution du corpus et fouille de données

La disposition des agrafes sur les parois de la tour de Mutte semble à première vue faire écho à cette histoire tumultueuse. Identifier celles qui appartiennent aux phases originelles de construction – milieu du XIII^e siècle pour les parties basses et fin du XV^e siècle pour les parties hautes – semble de prime abord difficile, étant donné l'ampleur des réparations auxquelles la tour a été confrontée entre les XVI^e et XX^e siècles. La très grande majorité de ces agrafes ne présentent pas de relation stratigraphique certaine, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas insérées à l'intérieur de la maçonnerie, sous une ou plusieurs assises de pierre, mais implantées en surface sur les façades : elles pourraient donc avoir été mises en place lors de n'importe quelle phase de construction ou de restauration de la tour².

Les restaurations conduites par C. Bottineau, Architecte en Chef des Monuments Historiques, entre 2009 et 2014 ont permis d'avoir un accès privilégié pour étudier ce matériel in situ et procéder à des prélèvements pour réaliser des analyses métallographiques sur les armatures qui ont été déposées. Plusieurs méthodes ont été envisagées pour sélectionner des groupes d'agrafes pertinents contemporains de la construction.

De précédentes études ont démontré que les fers produits en bas fourneau par le procédé direct et ceux issus de l'affinage de la fonte au cours du procédé indirect pouvaient être très clairement distingués par l'analyse chimique des impuretés qu'ils contiennent, à savoir les inclusions non métalliques (Dillmann et L'Héritier, 2007; Disser *et al.*, 2014). Nous reviendrons plus tard sur cette méthodologie. Cette discrimination ne s'avère pas ici pertinente pour classer ces fers de manière chronologique, car à la fin du XV^e siècle, période d'édification des parties supérieures de la tour, correspond à la période de transition entre les deux procédés métallurgiques. Les fers mis en œuvre sont donc susceptibles d'avoir été produits par l'une ou l'autre des deux filières.

L'étude morphologique des agrafes a permis de classer certaines d'entre elles selon leur procédé de mise en forme : par martelage ou par fenderie (Disser *et al.*, 2014). La fenderie est un procédé de mise en forme du fer à chaud qui se développe dans le courant du XVII^e siècle (Gille, 1978, p. 627). Il est donc évident que de telles agrafes produites par fenderie ne peuvent que provenir d'une phase de restauration de la tour. 96 renforts parmi les 450 étudiés présentent les indices d'une mise en forme de ce type³. Cependant, ce premier classement typologique ne peut être exhaustif car les marques laissées par les rouleaux de fenderie sont susceptibles d'avoir été altérées par les étapes ultérieures de forge voire rendues illisibles par la corrosion. En outre, toutes les agrafes issues des restaurations ne sont pas forcément mises en forme au moyen d'un tel procédé. La discrimination entre les différentes phases de construction/restauration est donc incomplète.

Outre le fait de répondre à une problématique précise (stratégie de mise en œuvre des renforts, distinction des procédés sidérurgiques, provenance des matériaux), les résultats obtenus au terme de chaque étape de la réflexion se révéleront essentiels pour effectuer un échantillonnage pertinent, à même de traiter l'étape suivante. Une représentation synthétique des études réalisées est présentée en Fig. 1.

² Ce n'est toutefois pas le cas d'une partie des agrafes de la chambre des cloches. D'après leur implantation dans le bâti, certains scellements situés sur les faces latérales des arcs ont nécessairement été réalisés en cours de construction car ils sont partiellement enfouis dans la maçonnerie.

³ L'action de fendre le métal peut être déclinée en deux étapes principales. Le métal est tout d'abord laminé afin de présenter une épaisseur donnée. Les barres aplaties obtenues sont ensuite découpées par le passage entre des taillants

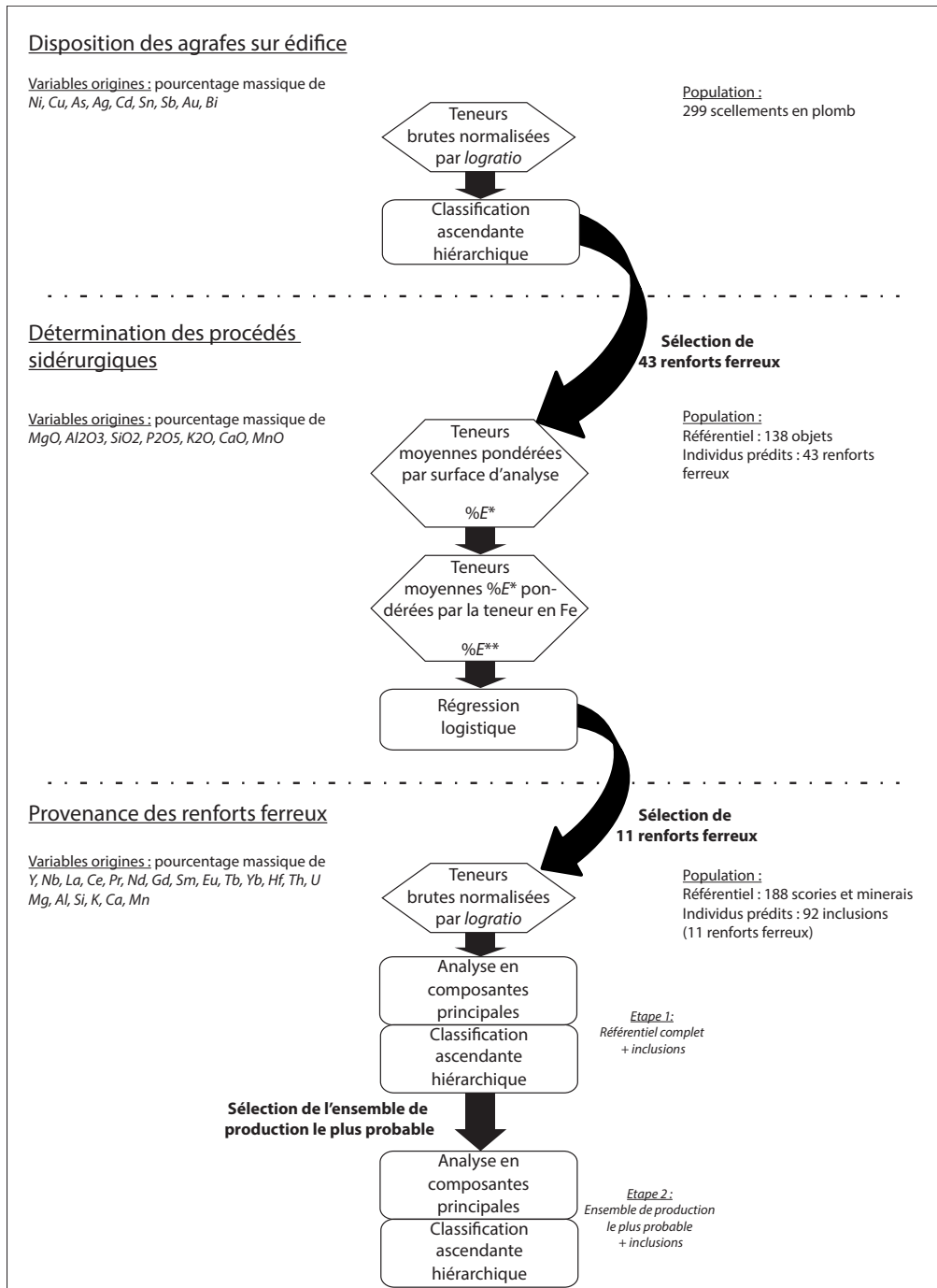


FIGURE 1. Synthèse de la démarche statistique développée sur les renforts ferreux de la tour de Mutte et leurs scellements de plomb

3. Définition des groupes de coulée de scellements en plomb

Compte tenu des remarques formulées précédemment, il était nécessaire de trouver un autre moyen pour surmonter ce premier écueil. L'approche choisie s'appuie sur l'analyse des plombs qui scellent ces armatures de fer dans la pierre. Le plomb est un matériau qui se caractérise par un point de fusion assez bas (327 °C), induisant une mise en œuvre et un recyclage aisés, qui ne nécessite aucun appareillage particulier. Il a récemment été montré que des scellements de plomb mis en place lors d'une même phase de construction ont des compositions en éléments traces⁴ proches lorsqu'ils proviennent du même mélange de matières premières sur le chantier de construction (Baron *et al.*, 2014; L'Héritier *et al.*, 2016). L'objectif est donc de déterminer des lots de scellements de plomb de composition homogène pour les associer à des phases de construction ou de restauration, suivant la localisation des agrafes dans le bâti. La composition de 300 scellements de plomb prélevés in situ lors des restaurations a ainsi pu être déterminée par analyse en LA-ICP-MS au Centre Ernest Babelon d'Orléans (IRAMAT CNRS UMR 5060)⁵ (selon la méthodologie proposée dans L'Héritier *et al.* (2016)). Afin de pouvoir observer leur disposition suivant les groupes de composition, la localisation de chaque scellement a été référencée dans un système d'information géographique (SIG ; logiciel ArcGis, ESRI) créé à partir du déroulé des plans⁶ des quatre façades et des coupes de la tour, réalisés par l'entreprise chargée des restaurations. (Fig. 2) La plupart proviennent des façades extérieures, mais certains ont également été prélevés dans la chambre des cloches, élevée à la fin du XVe siècle.

Tenant compte de travaux récents (L'Héritier *et al.*, 2016), neuf éléments chimiques sont considérés : Ni, Cu, As, Ag, Cd, Sn, Sb, Au, Bi. Mais tant le grand nombre d'échantillons traités que leur diversité potentielle liée à la quantité de phases de construction et de restauration considérées ne permettent pas d'identifier clairement des groupes correspondant à des lots de coulée homogènes. Un traitement de l'information chimique par le biais d'analyses multivariées s'avère indispensable afin de procéder à cette sélection.

Un alliage à base de plomb est caractérisé par une signature chimique propre des éléments et impuretés qui le composent. Cette particularité s'exprime soit par les teneurs absolues des éléments constitutifs, soit par des rapports élémentaires. Les alliages considérés se composent d'espèces chimiques présentes en des proportions très inégales. En effet, les concentrations de certains éléments étant inférieures au ppm (1 ppm = 0,0001%) tandis que d'autres sont supérieures au pourcent. Les variables associées aux composés les plus concentrés se verraient ainsi attribuer un poids très important dans une analyse multivariée. D'autre part, tenant compte des propriétés thermodynamiques des éléments constitutifs des alliages (Baron et Cochet, 2003; L'Héritier *et al.*, 2015), seuls neuf éléments parmi les 21 dosés sont considérés dans ce travail. Les problèmes inhérents à l'analyse d'un jeu de données de ce type sont largement décrits dans la littérature. Souhaitant réaliser des analyses multivariées sur ce sous-ensemble de données de composition chimique, il est nécessaire souligner que les concentrations élémentaires brutes

cylindriques imbriqués.

⁴ On désigne par ce terme les éléments chimiques constitutifs d'un matériau présents en de très faibles proportions. Les éléments chimiques présentent dans ce cas des teneurs inférieures à 100 parties par million, ou 0,01%.

⁵ En collaboration avec Bernard Gratuze (Centre Ernest Babelon ; IRAMAT UMR 5060)

⁶ Cette représentation a été réalisée à partir des relevés architecturaux gracieusement mis à disposition par Ch. Bottineau, architecte en chef des monuments historiques.

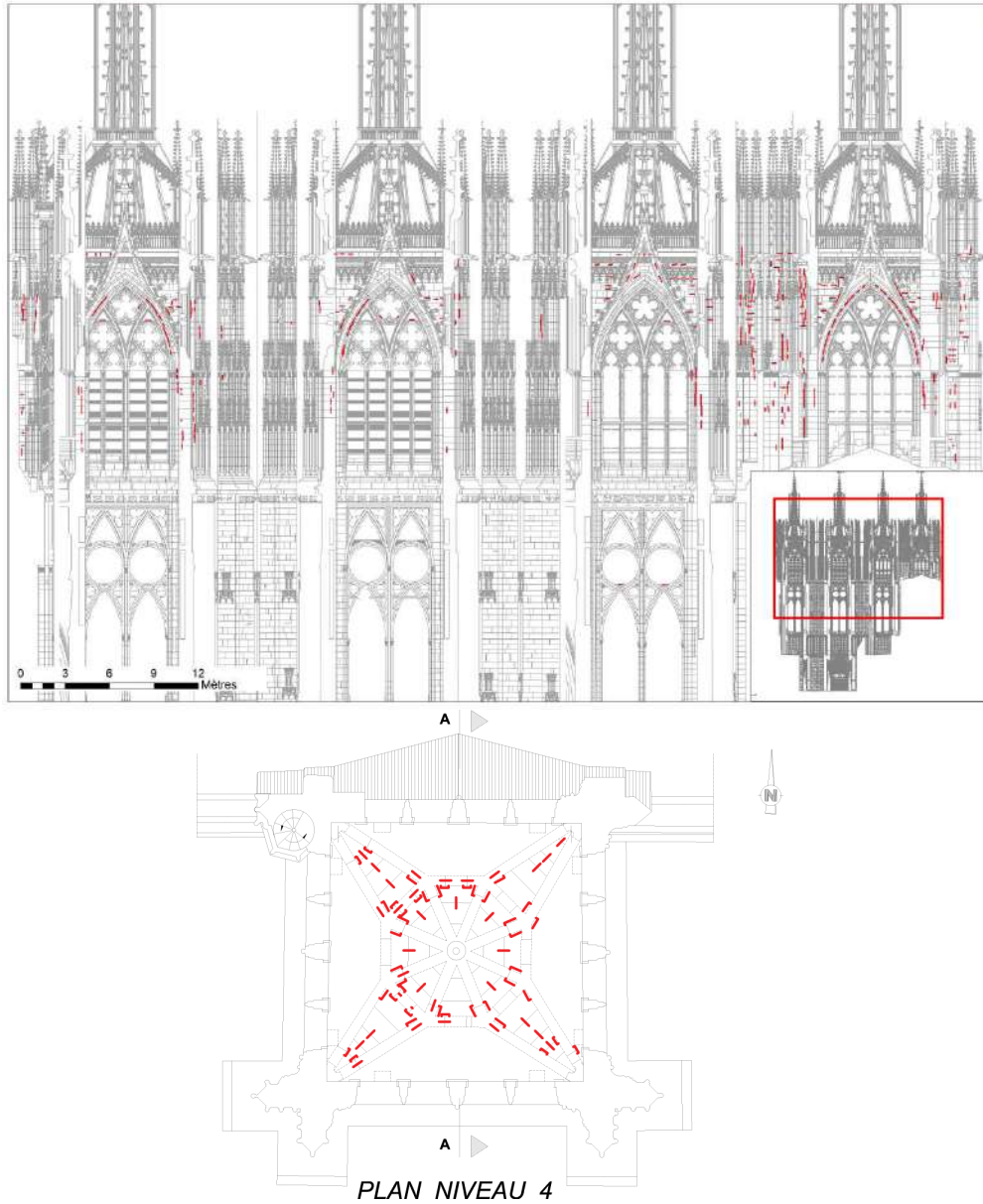


FIGURE 2. En haut : emplacements des renforts ferreux prélevés sur les façades de la tour de Mutte ; en bas : emplacements des renforts prélevés sur la voûte de la salle des cloches.

montrent pour la plupart une distribution très asymétrique (Fig. 3). L'emploi d'une transformation des données brutes est justifiée ici par trois facteurs : réduire l'asymétrie des distributions de teneurs élémentaires, réduire les différences d'échelle de concentrations élémentaires, favoriser l'examen des rapports élémentaires sur celui des teneurs seules. Dans le cas de figure présenté, une solution proposée (transformation log-ratio) par J. Aitchison (Aitchison, 1982; Aitchison *et al.*, 2002; Aitchison, 1986), basée sur la transformation logarithmique (décimale) des données centrées, a été préférée à une standardisation classique. En effet, de précédents travaux (Baxter et Freestone, 2006; Charlton *et al.*, 2012) suggèrent que la transformation log-ratio permet de privilégier l'analyse de la variance des rapports élémentaires sur celle des concentrations élémentaires en tant que telles. Les teneurs transformées montrent une distribution plus régulière et symétrique que les teneurs brutes.

La transformation de données employée s'exprime de la manière suivante :

$$y_{ij} = \log_{10} \left(\frac{x_{ij}}{G(x_i)} \right), \quad (1)$$

où y_{ij} est la valeur transformée, x_{ij} la valeur brute, et $G(x_i)$ la moyenne géométrique des p teneurs élémentaires caractérisant l'individu i , telle que :

$$G(x_i) = (x_{i1}x_{i2} \dots x_{ip})^{1/p} \quad (2)$$

Afin de mettre en évidence la structure de l'information chimique, et plus particulièrement des groupes d'individus présentant une composition chimique similaire, la classification ascendante hiérarchique est privilégiée. L'algorithme est appliqué sur les 9 rapports logarithmiques calculés précédemment. La métrique employée est la distance euclidienne. Du fait des caractéristiques de fusibilité du plomb, les groupes de coulée sont censés présenter chacun une signature chimique très homogène, ce qui s'exprimerait géométriquement par des clusters denses de forme plus ou moins sphérique. Tenant compte de ces caractéristiques attendues, le partitionnement est effectué au moyen du saut de Ward. Le nombre de classes d'individus qu'il apparaît pertinent de distinguer est défini par une méthode de type « elbow-method » (décrites notamment par Tibshirani *et al.*, 2001). Celle-ci privilégie l'observation de l'inertie interclasse. Le nombre de classes est ainsi défini par l'agglomération à partir de laquelle la perte d'inertie n'évolue plus de manière importante. Ce moyen de décision offre la possibilité de définir des groupes de scellements en plomb de signature chimique cohérente et distincts les uns des autres. Les résultats de la classification menée sur la composition chimique des plombs de scellement sont exprimés par le dendrogramme présenté en Fig. 4. Cette méthode permet de distinguer 6 groupes d'individus qui ont été reportés sur le SIG local, en respect du code couleur appliqué au dendrogramme. Malgré une légère dispersion, la répartition de ces « lots de coulée » montre une bonne cohérence à l'échelle du bâtiment.

Le groupe bleu se concentre essentiellement sur le réseau des grandes baies. Le groupe jaune regroupe principalement les plombs de la façade est (Fig. 5). Les quatre autres groupes apparaissent plus dispersés sur les façades, ce qui laisse à penser qu'ils ont pu être disposés à l'occasion de travaux postérieurs de consolidation de la maçonnerie.

La distribution des groupes dans la chambre des cloches est également très marquée. Trois groupes de compositions bien distinctes ont pu être identifiés (Fig. 6). Le premier (groupe vert) comprend cinq plombs scellant les agrafes des voûtains dans les angles nord-est et sud-est. Le

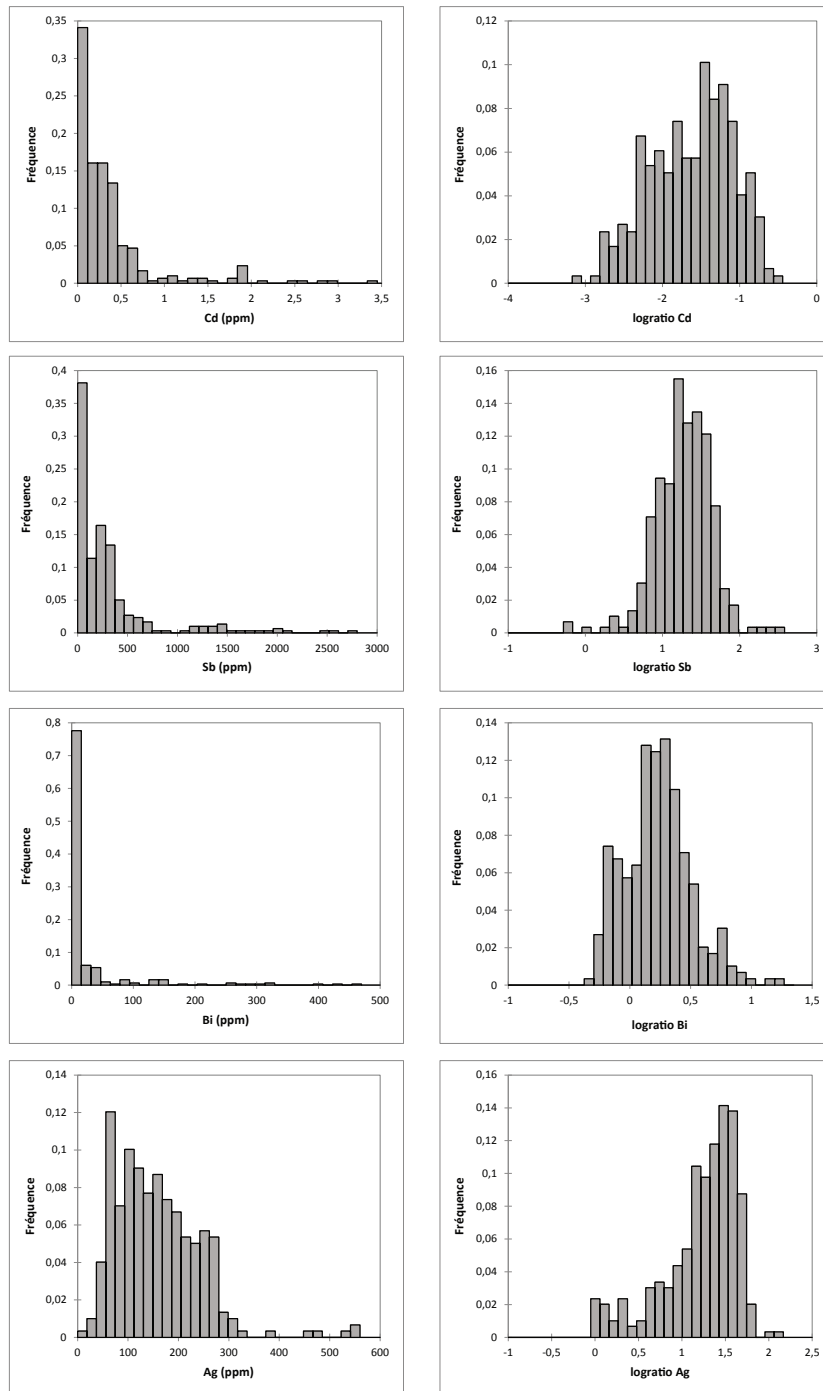


FIGURE 3. Distribution des teneurs brutes (à gauche) et transformées par logratio (à droite) de quatre éléments chimiques contenus dans les plombs étudiés.

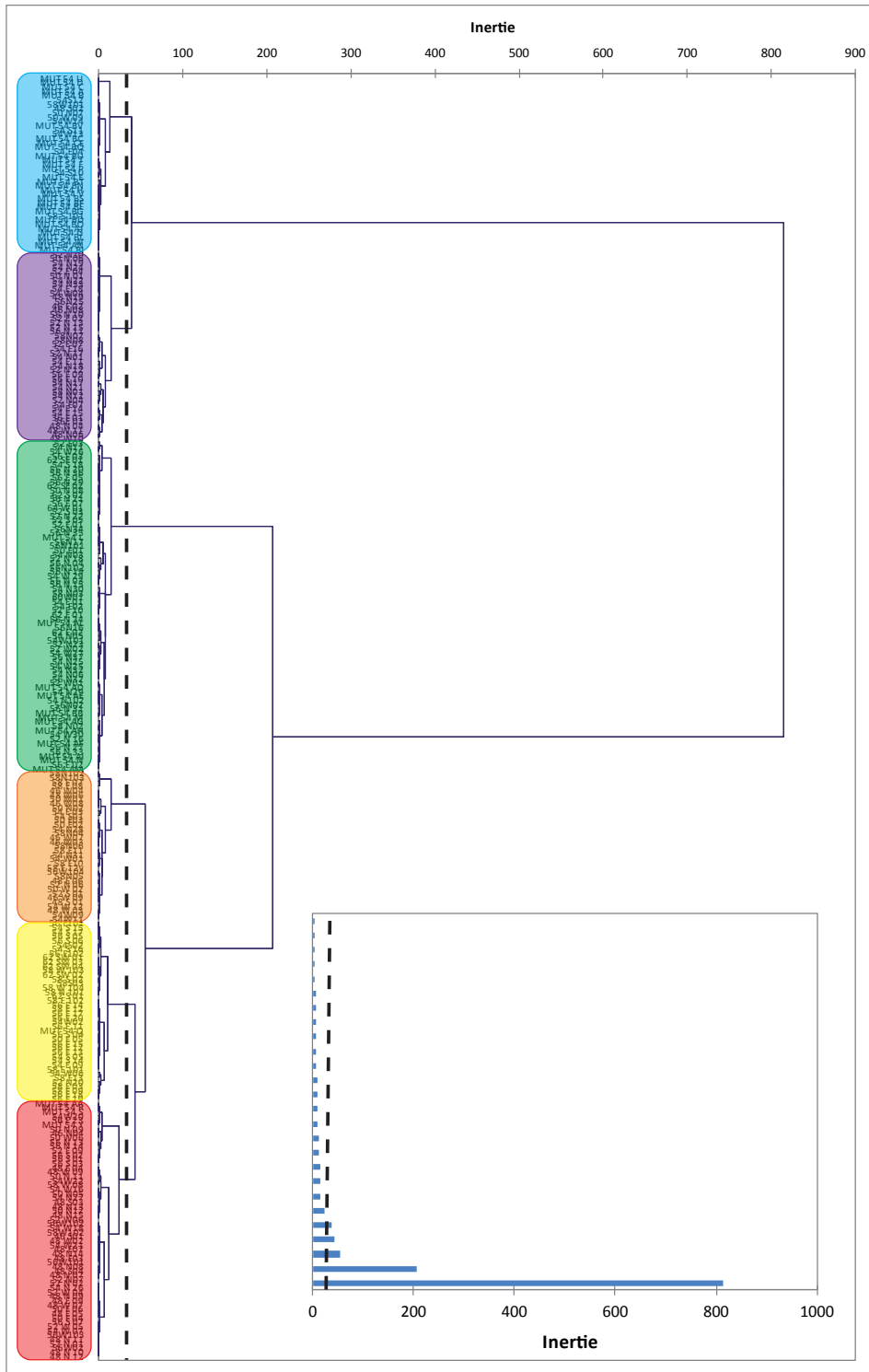


FIGURE 4. Dendrogramme présentant les résultats de la classification ascendante hiérarchique réalisée sur la composition chimique des plombs de scellement.

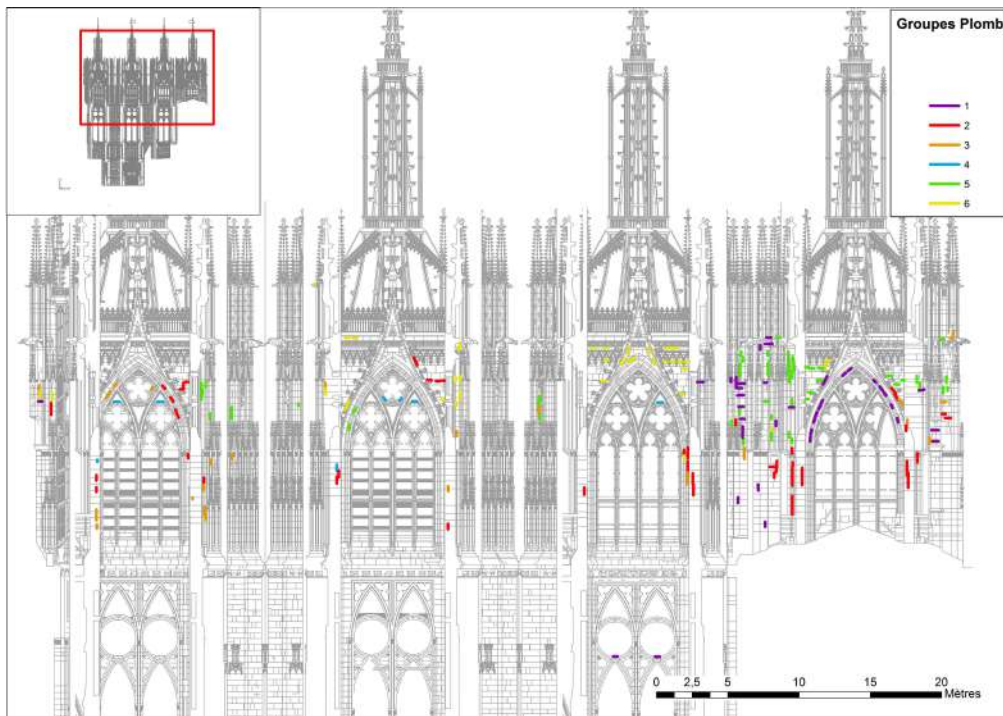


FIGURE 5. *Emplacement des renforts sur les façades de la tour en fonction de la classe de composition chimique attribuée aux plombs de scellement.*

second correspond aux plombs du voûtain nord-ouest ainsi qu'aux scellements situés sur la face inférieure des arcs de la voûte. Le troisième groupe comprend exclusivement des scellements de plomb ancrant des agrafes sur les faces latérales des arcs de la voûte. Ces groupes sont donc cohérents avec leur localisation dans la maçonnerie et révèlent trois phases bien distinctes de renforcement, qui suivent le cours de la construction de la voûte et attestent ainsi de la contemporanéité de l'ensemble des agrafes et de leurs scellements avec la pierre. Or, les deux principaux groupes de plombs identifiés dans la chambre des cloches (groupes bleu et jaune) s'étendent également à un certain nombre d'occurrences sur les façades de la tour à la même hauteur : au niveau des quadrilobes du réseau des grandes baies (groupe bleu) et sur les parois et le gâble de la façade est (groupe jaune). Cette correspondance révèle que ces plombs de la façade, et par conséquent les agrafes associées, ont bien été mis en œuvre en cours de construction, parallèlement aux scellements de la chambre des cloches, et non à la suite de restaurations ou de consolidations ultérieures. L'analyse des plombs a donc permis d'identifier et de sélectionner 118 agrafes issues avec certitude de la phase de construction de la tour comprise entre 1478 et 1483. Le groupe violet a également fait l'objet d'une attention particulière. Ce groupe n'est pas représenté au sein de la voûte de la salle des cloches. Il est, en revanche, observé uniquement sur la façade nord de la tour, ainsi que les deux massifs de flanquement septentrionaux. Plus particulièrement, tous les scellements présents sur le gable de la baie nord appartiennent à ce groupe de composition. La façade nord étant tournée vers la nef de la cathédrale, il est fort possible que le groupe violet soit lié aux réfections consécutives à l'incendie de la charpente de 1877. Il apparaissait intéressant d'identifier l'origine d'une partie des renforts ferreux associés à ce groupe. 43 agrafes de fer appartenant aux groupes violet, bleu et jaune ont ainsi été prélevées pour analyses métallographiques, afin de déterminer leur provenance technique et géographique⁷.

4. Détermination de l'origine technique des agrafes

La seconde étape a consisté à déterminer la filière technique dont sont issues les agrafes de fer mises en œuvre sur la tour de Mutte. De précédentes études ont démontré que les fers de réduction directe et les fers de réduction indirecte se distinguent par la composition chimique des inclusions de scorie piégées dans la matrice métallique (Dillmann et L'Héritier, 2007). Cette étude a réuni un corpus de référence comprenant 138 échantillons de fer provenant de 19 contextes archéologiques dispersés sur le territoire français. Les artefacts sont largement antérieurs ou postérieurs à la période de transition technologique⁸. Quatre-vingt-cinq fers de réduction directe et 53 de réduction indirecte composent ainsi le référentiel. Dans ce cas, l'objet de l'étude est de comparer la composition chimique des individus de provenance technique inconnue à celle du corpus de référence. Dillmann et L'Héritier (2007) proposaient un abaque de référence permettant d'établir cette comparaison de manière graphique (Fig. 7). Une zone d'incertitude, dont il est délicat de circonscrire précisément les limites, est visible à l'interface entre les deux domaines subsiste néanmoins avec cette approche. L'enjeu est alors de préciser cette zone d'incertitude, mais aussi d'évaluer la probabilité d'attribution de chaque renfort de la tour de Mutte à l'une ou l'autre filière technique.

⁷ Les méthodes d'analyses métallographique et élémentaire utilisées sont détaillées dans Gratuze *et al.* (2001); Leroy *et al.* (2012); L'Héritier *et al.* (2013); Pagès *et al.* (2011).

⁸ C'est-à-dire antérieurs au XIIIe s. et postérieurs au XVIIIe s. pour le nord de l'Europe Occidentale.

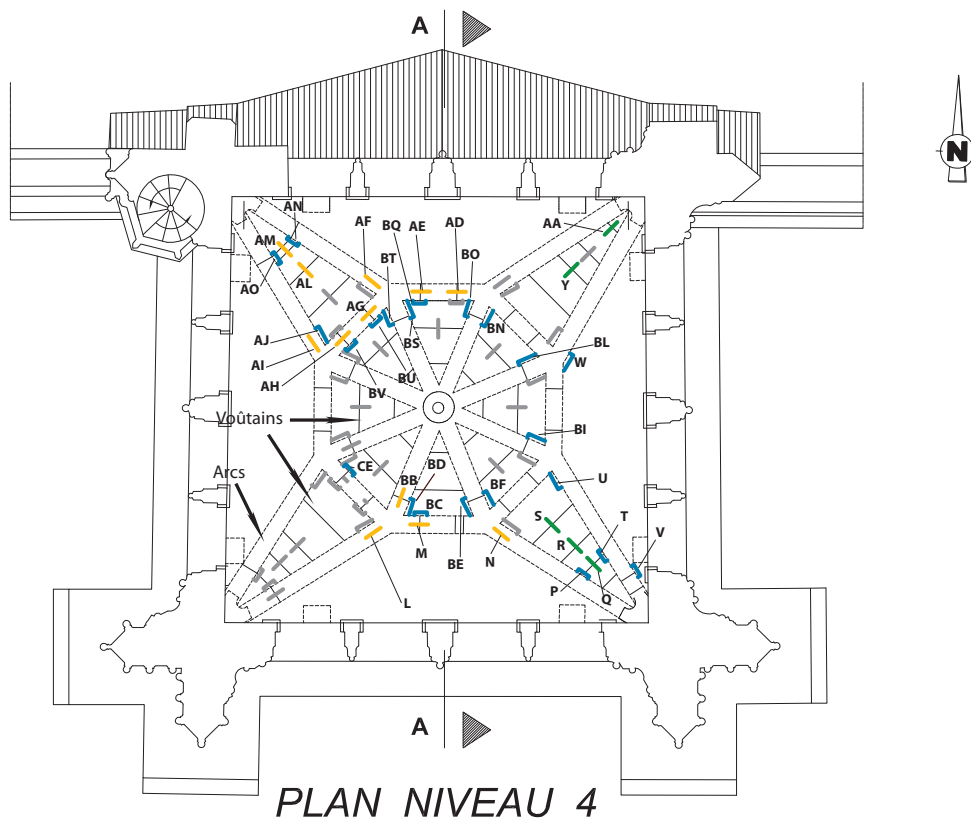


FIGURE 6. Emplacement des renforts de la voûte de la salle des cloches en fonction de la classe de composition chimique attribuée aux plombs de scellement.

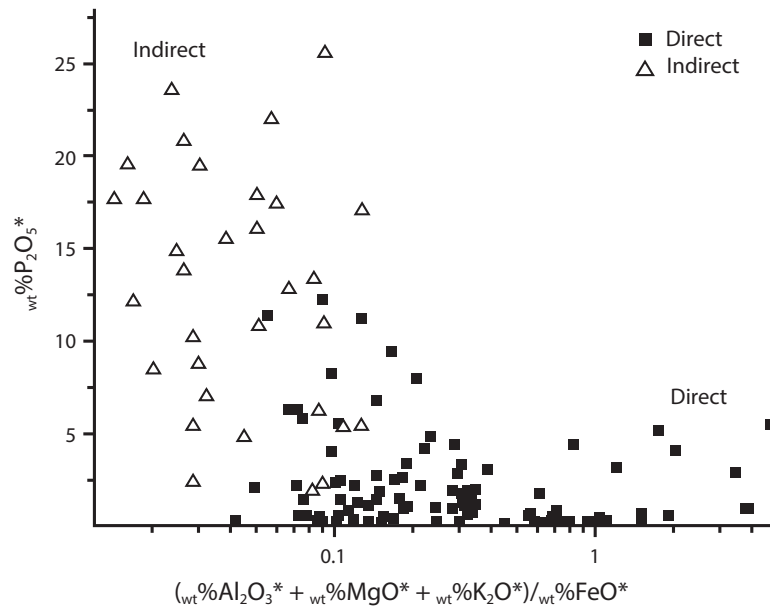


FIGURE 7. Abaque de comparaison des procédés proposé par *Dillmann et L'Héritier (2007)*.

Dans ce cas également, les teneurs absolues des éléments chimiques ne peuvent être prises en compte telles quelles. En effet, la scorie étant un matériau polyphasé, ses constituants peuvent être présents en proportions variables selon l'échelle d'observation, ce qui peut conduire à des effets d'enrichissement ponctuels.

Tenant compte de ce facteur, une normalisation a été appliquée aux teneurs brutes des principaux composés majeurs des inclusions : MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, MnO. Il s'agit, dans un premier temps, de définir les teneurs moyennes des composés chimiques à l'échelle de chaque objet, ce qui permet de s'affranchir des enrichissements ponctuels. Ceci est réalisé en pondérant les teneurs par la surface analysée pour chaque inclusion selon l'opération suivante

$$E^* = \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i \times S_i}{S_T} \right), \quad (3)$$

où

- E^* est la teneur moyenne d'un composé E à l'échelle d'un objet ;
- E_i est la teneur d'un composé E pour une inclusion donnée i ;
- S_i est la surface de l'inclusion i observée en coupe lors de l'analyse ;
- S_T est la surface totale d'inclusions analysées.

Les quantités d'oxydes de fer, dépendant des conditions de fonctionnement des structures métallurgiques, peuvent varier sensiblement d'un objet à l'autre (de quelques pourcents à plusieurs dizaines de pourcents). Afin d'être en mesure de comparer différents produits sidérurgiques, les teneurs moyennes des composés chimiques d'intérêt (MgO*, Al₂O₃*, SiO₂*, P₂O₅*, K₂O*,

CaO*, MnO*) ont été normalisées par la teneur moyenne en fer

$$E^{**} = \frac{E^* \times 100}{100 - FeO^*} \quad (4)$$

Cette étape préparatoire permettant de s'affranchir des biais causés par les conditions opératoires, la signature chimique des objets peut être employée pour déterminer le procédé technique dont ils sont issus : le procédé direct en bas fourneaux ou la filière indirecte en hauts fourneaux et affinerie. Cette question présente un caractère dichotomique évident et la régression logistique s'avère particulièrement adaptée à un tel cas de figure. Un modèle a été calculé à partir du corpus d'apprentissage de 138 individus. Les prédicteurs sont les teneurs normalisées des principaux composés chimiques des inclusions, telles que le modèle s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Logit}(p) = & \beta^0 + \beta^{Mg}(MgO^{**}) + \beta^{Al}(Al_2O_3^{**}) + \beta^{Si}(SiO_2^{**}) + \beta^P(P_2O_5^{**}) + \beta^K(K_2O^{**}) \\ & + \beta^{Ca}(CaO^{**}) + \beta^{Al}(Al_2O_3^{**}) + \beta^{Mn}(MnO^{**}) + \varepsilon \quad (5) \end{aligned}$$

L'estimation par maximum de vraisemblance du modèle est réalisée par un algorithme d'optimisation bayésien incorporé à la fonction bayesglm de la bibliothèque R arm (Gelman et Su, 2015). Les paramètres du modèle obtenu sont exposés dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Paramètres de la régression logistique calculés à partir des caractéristiques chimiques du corpus d'apprentissage

Paramètre	Estimation du paramètre	Erreur standard
β_0	5,22	3,320
β_{Mg}	0,13	0,35
β_{Al}	-0,95	0,25
β_{Si}	0,007	0,043
β_P	0,16	0,065
β_K	-0,84	0,44
β_{Ca}	0,088	0,058
β_{Mn}	0,018	0,091

La qualité prédictive du modèle a été évaluée en employant une procédure de rééchantillonnage de type jackknife. Chaque individu composant le corpus d'apprentissage est retiré successivement et considéré comme un individu d'origine technique inconnue. La probabilité d'attribution de celui-ci à l'un ou l'autre des procédés est déterminée à partir du sous-modèle créé, ajusté aux 137 individus restants. 138 tests sont ainsi réalisés successivement à partir de sous-modèles pouvant être considérés comme très proches de l'original, puisque seul un individu est retiré. Des seuils T sont appliqués successivement aux valeurs p et (1-p) permettant d'attribuer l'individu au procédé direct (Tdirect) ou indirect (Tindirect) (Tableau 2). Les résultats obtenus sont confrontés à l'origine technique réelle des individus et permettent de construire la matrice de confusion suivante.

Le seuil [p ; 1- p] le plus satisfaisant est celui correspondant à [0,3 ; 0,7], puisqu'aucune erreur d'attribution n'est observée, tandis que seuls 3,6 % des individus ne peuvent être associés à un procédé. La régression logistique a ensuite été employée pour déterminer l'origine technique potentielle des fers architecturaux de la tour de Mutte. Parmi les 43 individus dont l'origine

TABLEAU 2. Évaluation de la capacité prédictive de la régression logistique calculée à partir des caractéristiques chimiques du corpus d'apprentissage.

Seuils [Tdirect ;Tindirect]	[0,2 ; 0,8]	[0,3 ; 0,7]	[0,4 ; 0,6]	[0,5 ; 0,5]
% Prédictions justes	94,9	96,4	97	97,1
% Prédictions fausses	0	0	0,8	2,9
% Indéterminé	5,1	3,6	2,2	0

technique est questionnée, 11 sont attribués au procédé direct et 30 au procédé indirect. La filière technique n'a pu être déterminée pour les renforts MUT54N21 et MUT54W04, les valeurs p étant comprises entre 0,3 et 0,7.

Les caractéristiques techniques des renforts ferreux ont été considérées a posteriori afin de valider les résultats issus de la régression logistique. Rappelons que plusieurs agrafes liées au groupe de scellements de plomb 1, et potentiellement disposées lors d'une restauration ont été étudiées. Parmi celles-ci, 6 individus présentent en effet les traces d'une mise en forme par laminage (Tableau 3). La technique étant développée après la généralisation de l'emploi du procédé indirect dans le nord de la France, cette caractéristique devrait être propre aux fers issus du procédé indirect. Les 6 individus mis en forme par fenderie sont effectivement associés à ce procédé. Inversement, aucune agrafe parmi les 11 associées au procédé direct n'a été laminée. Ce constat renforce, à l'aide d'arguments typonomiques, la validité statistique de la régression logistique.

Les résultats obtenus montrent, par ailleurs, que des fers issus des deux procédés sidérurgiques sont acquis de manière simultanée par le chantier de construction du beffroi. C'est également la première fois que du fer de réduction indirecte est identifié sur un monument ou un site archéologique lorrain. Ces résultats donnent donc corps aux études historiques qui décrivent l'implantation du procédé dans la région à cette époque (Horikoshi, 2008). Ils vont même au-delà, car ils montrent clairement la prédominance déjà acquise dans la région pour ce type de fourniture par le nouveau procédé, qui pourvoit dans ce cas plus des deux tiers du fer du chantier (soit 26 individus sur 35, déduction faite des six crampons laminés, plus tardifs, et des deux crampons dont la filière est indéterminée). Malgré tout, les fers de bas fourneaux sont toujours présents sur le marché. Cette concomitance des deux procédés dans cette partie de l'Europe à la fin du XVe siècle, déjà suggérée par les fouilles archéologiques (Leroy *et al.*, 2015a; Leroy, 1998), est donc désormais concrètement mise en évidence. Cette coexistence des deux filières de production amène par ailleurs à s'interroger sur la provenance du fer, puisqu'elle implique forcément plusieurs sources d'approvisionnement.

Enfin, ces caractéristiques permettent de préciser la nature des renforts associés au groupe de scellements violet. Celui-ci est constitué à la fois d'agrafes laminées et d'autres issues du procédé direct. Il est plus que raisonnable de considérer qu'il s'agit là d'une restauration menée assez tardivement, au plus tôt au XVIIe s. Mais ce travail de consolidation ne s'est pas appuyé uniquement sur des fers contemporains, puisqu'il emploie également des éléments issus du procédé direct. Les restaurateurs ont ainsi également réutilisé des « vieux fers » architecturaux en complément des éléments laminés. Ces vieux fers pourraient provenir du démantèlement d'une partie de la maçonnerie à l'occasion de la restauration.

Cette démarche menée sur l'origine technique des fers architecturaux autorise à la fois une

TABLEAU 3. Résultats de la régression logistique appliquée aux renforts ferreux de la tour de Mutte. Pour les procédés : D=Direct, I=Indirect, ND=Non Déterminé

	Individu	P(Indirect)	P(Direct)	Logit(p)	Procédé	Mise en forme
1	MUT36E01	<0,001	>0,999	9,91	D	Martelé
2	MUT36E02	<0,01	>0,99	5,41	D	Martelé
3	MUT46E02	>0,999	<0,001	7,68	I	Laminé
4	MUT52E04	0,097	0,03	3,64	I	Martelé
5	MUT52E10	0,88	0,12	1,95	I	Martelé
6	MUT52N13	<0,001	>0,999	11,10	D	Martelé
7	MUT52N15	<0,001	>0,999	18,00	D	Martelé
8	MUT54E14	>0,999	<0,001	7,59	I	Martelé
9	MUT54E16	0,88	0,12	4,38	I	Martelé
10	MUT54N18	>0,999	<0,001	6,76	I	Laminé
11	MUT54N19	>0,99	<0,01	4,73	I	Laminé
12	MUT54N21	0,68	0,32	0,75	ND	Martelé
13	MUT54N22	<0,001	>0,999	9,45	D	Martelé
14	MUT54N24	>0,99	<0,01	5,10	I	Laminé
15	MUT54N30	<0,001	>0,999	16,20	D	Martelé
16	MUT54N33	0,94	0,06	2,78	I	Martelé
17	MUT54S10	>0,99	<0,01	5,29	I	Martelé
18	MUT54W04	0,66	0,33	0,69	ND	Martelé
19	MUT54W16	0,98	0,02	3,88	I	Martelé
20	MUT56E03	<0,001	>0,999	12,10	D	Martelé
21	MUT56E13	0,98	0,02	4,00	I	Martelé
22	MUT56E12	<0,001	>0,999	11,10	D	Martelé
23	MUT56E09	>0,99	<0,01	6,27	I	Martelé
24	MUT58E10	<0,001	>0,999	12,00	D	Martelé
25	MUT56E18	0,99	0,01	6,55	I	Martelé
26	MUT56E23	>0,99	<0,01	2,90	I	Martelé
27	MUT56N10	>0,99	<0,01	3,55	I	Laminé
28	MUT56N11	>0,999	<0,001	8,14	I	Laminé
29	MUT56N32	0,98	0,02	3,66	I	Martelé
30	MUT56S02	0,98	0,02	6,50	I	Martelé
31	MUT56S05	>0,99	<0,01	5,33	I	Martelé
32	MUT58E09	<0,001	>0,999	15,50	D	Martelé
33	MUT58E17	>0,99	<0,01	5,70	I	Martelé
34	MUT58N01	>0,999	<0,001	8,30	I	Martelé
35	MUT60N01	0,82	0,18	1,51	I	Indéfini
36	MUT60N02	>0,99	<0,01	5,09	I	Indéfini
37	MUT62SW01	<0,001	>0,999	10,90	D	Martelé
38	MUT54S	0,98	0,02	3,88	I	Martelé
39	MUT54AF	>0,99	<0,01	6,05	I	Martelé
40	MUT54AN	0,8	0,2	1,39	I	Martelé
41	MUT54BB	0,96	0,04	3,06	I	Martelé
42	MUT54BV	0,098	0,02	3,73	I	Martelé
43	MUT54CE	0,8	0,2	1,43	I	Martelé

réflexion relative à l'histoire des techniques à l'époque médiévale, mais également sur l'histoire post construction de l'édifice. Le contexte socio-économique de ce chantier de construction est éclairé par une étude visant à identifier les sources du métal.

5. Étude de provenance

De précédents travaux ont montré qu'il était, dans certains cas, possible de déterminer l'origine géographique des alliages ferreux (Desaulty *et al.*, 2009; Leroy *et al.*, 2012). Cette étude de provenance passe également par l'analyse de la composition des inclusions, en éléments traces cette fois. L'objectif est ensuite de comparer leur composition à celle des scories retrouvées lors de fouilles d'ateliers de production. Notons toutefois à ce stade que l'approche comparative en question n'est valable que pour les fers de réduction directe. En effet, les inclusions de scories contenues dans la matrice des fers de réduction indirecte ne sont pas caractéristiques de l'étape de réduction, qui voit la fusion du minerai de fer et sa transformation en fonte liquide (dénuée d'inclusions) au sein du haut fourneau. Les inclusions proviennent alors de l'étape d'affinage au cours de laquelle la fonte est décarburée pour être retransformée en fer forgeable (Desaulty, 2008; Dillmann *et al.*, 1996). La présente étude sur la provenance des renforts de fer de la tour de Mutte ne s'applique donc qu'aux 11 fers de réduction directe identifiés au terme de la précédente étape.

Afin d'établir la provenance d'un produit sidérurgique, il est nécessaire de démontrer une compatibilité chimique entre celui-ci et un complexe de production sidérurgique présentant une signature chimique donnée. Plusieurs travaux récents se sont penchés sur cette question (Coustures *et al.*, 2003; Desaulty *et al.*, 2009; Disser, 2014; Leroy *et al.*, 2012). Ces études ont montré qu'il est nécessaire de considérer un nombre conséquent de variables (rapports élémentaires). Elles ont également défini quels étaient les éléments chimiques les plus adéquats pour soutenir une démarche d'identification de provenance. Les travaux les plus récents (Disser *et al.*, 2016) mettent en jeu 6 éléments majeurs (Mg, Al, Si, K, Ca, Mn) et 14 éléments traces (Y, La, Ce, Eu, Sm, Nd, Gd, Pr, Hf, Nb, Tb, Yb, Th, U).

5.1. Corpus de référence

L'approche statistique développée dans ce cadre se développe en deux temps (Disser *et al.*, 2016). Premièrement, un corpus de référence est constitué. Dans ce cadre, il n'est plus constitué d'objets ferreux, mais d'échantillons prélevés sur des ateliers métallurgiques (minerais et scories) permettant de définir la signature chimique des ateliers sidérurgiques reconnus au sein de l'espace lorrain. Contrairement à la problématique précédente, pour laquelle seules deux issues sont possibles, les origines potentielles sont ici multiples. Il n'est par ailleurs pas certain que la totalité des entités productrices potentielles aient été reconnues et caractérisées chimiquement. Une démarche descriptive non supervisée a été privilégiée afin de définir les origines potentielles, reposant uniquement sur la signature chimique des déchets métallurgiques. Dans un second temps, le partitionnement du référentiel constitué sera employé à identifier l'origine des renforts ferreux.

Tenant compte des remarques formulées précédemment pour les alliages à base de plomb, la normalisation des données par transformation log-ratio (équation (1)) a été également employée dans ce cadre. Toutefois, les teneurs de certains éléments étant susceptibles d'être fréquemment inférieures aux limites de détection des appareils de mesure, la transformation ne fait intervenir ici

que les éléments les plus abondants (Al, Si et Ca pour les majeurs ; Y, La, Ce, Sm, Eu pour les éléments traces). Les jeux d'éléments majeurs et traces sont par ailleurs normalisés indépendamment l'un de l'autre, puisque leurs teneurs sont mesurées par des dispositifs analytiques différents.

Le référentiel chimique constitué dans le cadre de cette étude rassemble 188 individus (minerais et scories). Ceux-ci proviennent de sites sidérurgiques lorrains ayant pu alimenter les chantiers de construction de la tour de la Mutte. Plusieurs secteurs géographiques sont concernés par cette enquête et présentent des minerais aux caractéristiques chimiques différentes. Afin de définir des entités chimiquement distinctes, une démarche reposant sur des analyses multivariées descriptives a été adoptée. Les classes d'individus ont été définies par classification ascendante hiérarchique. Tenant compte des réflexions développées par [Husson *et al.* \(2016\)](#), nous avons choisi de réaliser au préalable une analyse en composantes principales sur les vingt log-ratios calculés précédemment. L'ACP est ainsi employée en guise de prétraitement des données chimiques. Le clustering est alors appliqué sur les coordonnées des individus sur les premières composantes principales, ce qui permet de s'affranchir d'informations moins pertinentes qui seraient portées par les dernières composantes. En effet, les dernières composantes principales expriment, selon [Husson *et al.* \(2016\)](#), le bruit issu de biais analytiques (par exemple les dosages en limite de détection). Il est toutefois nécessaire de souligner que la réalisation d'une classification sur les résultats d'une ACP peut aboutir à la perte d'informations pertinente. Afin de vérifier l'utilité de cette pratique dans le cas d'étude présenté, une comparaison a été effectuée entre les résultats d'une classification sans ACP préalable et d'une classification réalisée sur les résultats d'une ACP (Fig. 8). Elle montre que dans notre cas, la combinaison ACP+HAC permet de mieux discriminer les ensembles de production. Cela est plus particulièrement perceptible pour les ensembles Minette (orange) et Bajocien-Bathonien (vert). Sans ACP, plusieurs individus de l'ensemble Minette sont classés sur une branche comprenant les ensembles Barrois, Fer Fort, St Dizier HMA et Bajocien-Bathonien. Un individu du Bajocien-Bathonien est par ailleurs classé parmi les branches comprenant la grande majorité des individus Minette. L'application de la classification sur les coordonnées des individus sur les composantes de l'ACP permet en revanche de distinguer clairement les ensembles de production. Cette solution a donc été privilégiée dans notre cas. Nous avons choisi de considérer les composantes dont l'inertie totale cumule 90 % de l'information exprimée par l'ACP. Le nombre de classes d'individus qu'il apparaît statistiquement pertinent de définir est fixé comme auparavant par l'observation des sauts d'inertie. Les résultats obtenus sur le corpus de référence sont présentés sur la partie droite de la Fig. 8.

Six classes sont définies par ce biais. Il est important de noter que les classes d'individus correspondent de manière exclusive à l'emploi de différents minerais de fer lorrains. Nous sommes ainsi en mesure, par cette méthode, de définir des entités chimiques cohérentes liées aux caractéristiques des minerais exploités. En replaçant les individus dans leur contexte archéologique et historique, il est possible de définir des ensembles de production susceptibles d'avoir alimenté en fer les chantiers de construction considérés.

5.2. Une démarche inférentielle basée sur les statistiques descriptives

Ce référentiel peut être utilisé pour déterminer l'origine des produits ferreux en circulation aux époques anciennes, en établissant une compatibilité chimique entre les ensembles de production et les objets en fer. Afin de traiter ce type de question, des méthodes supervisées capables de déter-

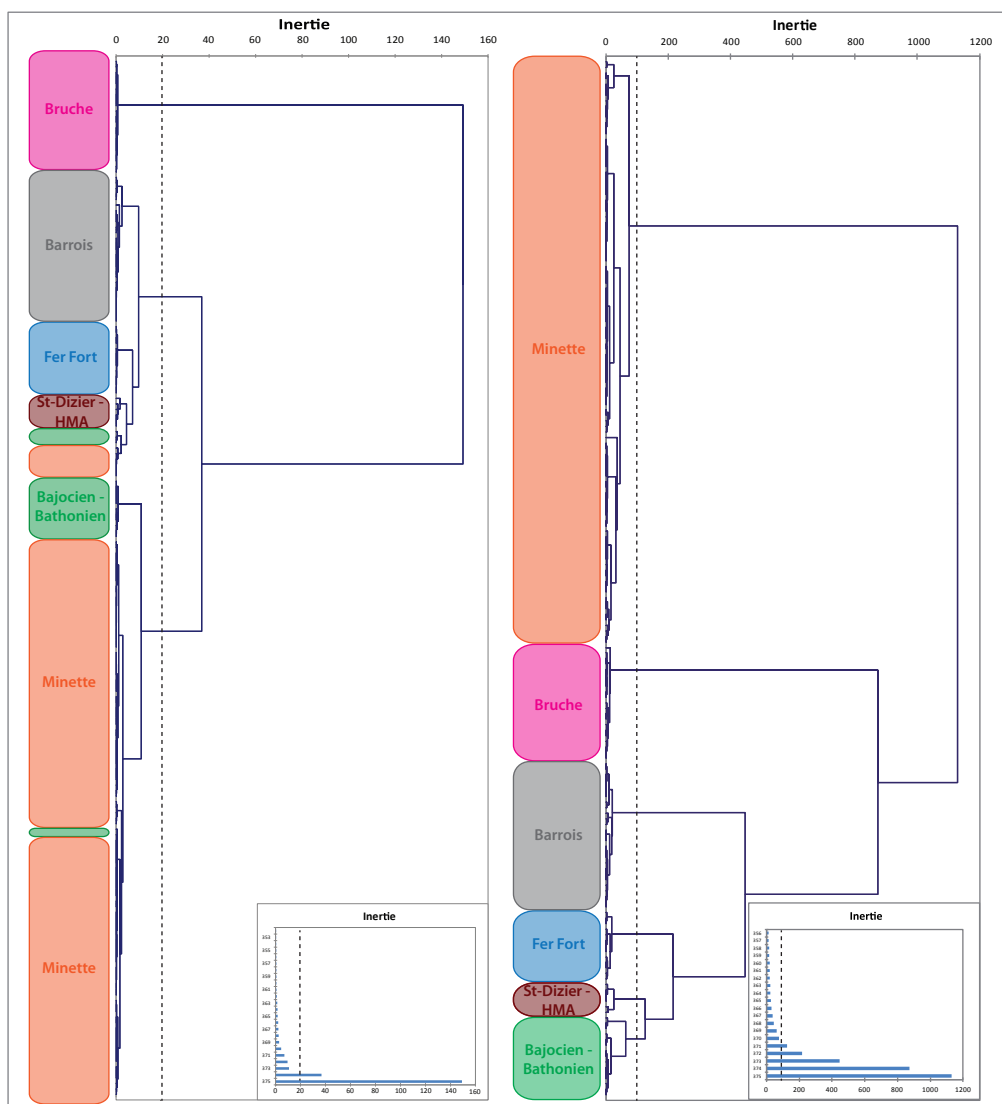


FIGURE 8. Dendrogrammes présentant les résultats de la classification réalisée sur des déchets métallurgiques issus d'ateliers sidérurgiques anciens en Lorraine. A gauche : classification réalisée sans ACP préalable ; à droite : classification réalisée après ACP.

miner la probabilité d'appartenance d'individus d'origine inconnue à l'une ou l'autre catégorie du référentiel sont généralement employées. Or dans le cas présent, il est impossible de déterminer dans quelle mesure le référentiel géochimique constitué est représentatif de l'étendue des sources potentielles de métal dans un contexte donné. En conséquence, il est nécessaire d'envisager le fait que la source effective n'a pas été découverte par les opérations archéologiques, et n'a donc pas pu être intégrée au référentiel. Différentes méthodes multivariées supervisées ont été utilisées sans parvenir à s'affranchir de cette contrainte forte. Toutes les méthodes d'apprentissage (analyse factorielle discriminante, modèle linéaire généralisé, gradient boosting, . . .) envisagées pour traiter de la provenance reposent en effet sur l'hypothèse que la source effective est intégrée au référentiel d'apprentissage, sans pouvoir envisager une origine extérieure à celui-ci. Afin de ne pas biaiser les interprétations que l'on pourrait tirer d'une approche prédictive, nous avons privilégié une approche reposant uniquement sur des méthodes multivariées descriptives et non supervisées. Le critère de validation de la provenance est dans ce cas une compatibilité chimique objective : la signature chimique des objets d'origine inconnue doit être comprise de manière absolue dans le domaine chimique de l'ensemble de production, qui parmi le référentiel, constitue la source la plus probable.

Afin de déterminer l'origine potentielle des onze renforts métalliques considérés, une nouvelle succession d'ACP et CAH est donc mise en œuvre, en intégrant cette fois-ci les caractéristiques chimiques des objets. Par objet, une douzaine d'inclusions de scorie ont bénéficié d'une caractérisation chimique en éléments traces, et font l'objet d'un tri préalable⁹ afin de retirer les analyses affectées par des biais liés à la mesure. Quatre-vingt-douze inclusions ont ainsi été ajoutées à l'analyse multivariée. Celles-ci sont toutes associées à l'une des classes définies au préalable, figurée en orange. Cette classe est liée à l'exploitation d'un minerai de fer lorrain particulier, la Minette lorraine (Leroy, 1997). Les résultats de cette analyse permettent ainsi de définir, parmi le référentiel géochimique, la classe qui constitue l'origine la plus probable pour le métal (Fig. 9).

A l'échelle considérée, cette approche apparaît toutefois insuffisante pour établir de manière absolue une compatibilité chimique entre l'ensemble de production probable et les renforts ferreux. Une dernière succession ACP-CAH est réalisée, cette fois-ci sur une population restreinte, regroupant uniquement les 108 individus qui composent l'ensemble associé à l'exploitation de la Minette lorraine, et les 92 inclusions de scorie. Le dendrogramme présenté en Fig. 10 montre une distinction relative entre les individus composant l'ensemble Minette et les inclusions de scorie. Huit scories de réduction de la Minette sont toutefois classées dans les branches composées majoritairement d'inclusions de scorie. Ce résultat suggère que ces marqueurs géochimiques, attribués sans ambiguïté à l'ensemble de production (ils sont bien issus d'ateliers sidérurgiques exploitant la Minette lorraine), sont distingués du reste des individus « Minette » par une inertie du même ordre que celle qui distingue ces individus de la plupart des objets. Les objets et les témoins métallurgiques ne sont pas dissociés de manière absolue, ce qui permet d'établir leur compatibilité chimique.

Ces résultats permettent de circonscrire l'origine du métal de réduction directe à deux zones de production métallurgiques actives au cours du Moyen Age : le Plateau de Haye, à l'ouest de l'agglomération nancéienne, et le Pays-Haut, située à quelques dizaines de kilomètres au

⁹ Les données de compositions sont déterminées à partir du rapport entre le signal de chaque mesure et le bruit de fond mesuré à intervalles réguliers. Si ce rapport est faible, l'erreur relative de mesure est considérée comme trop importante, et l'analyse est éliminée du processus de traitement.

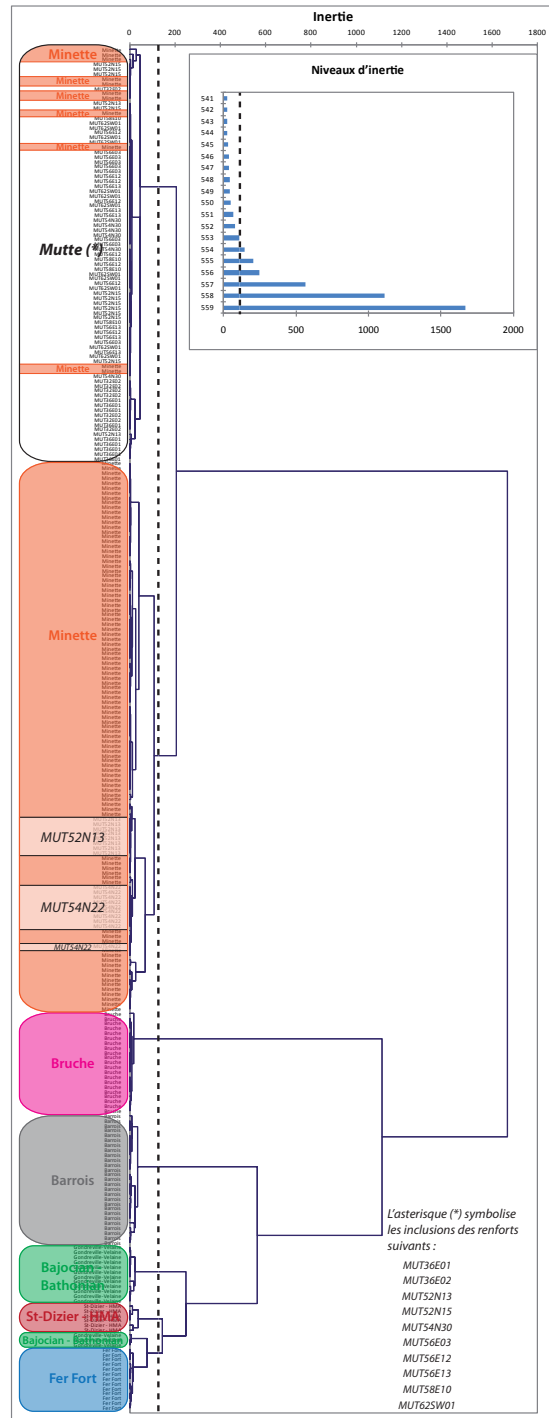


FIGURE 9. Dendrogramme présentant les résultats de la classification réalisée à la fois sur le corpus de référence et les inclusions des renforts ferreux de la tour de Mutte.

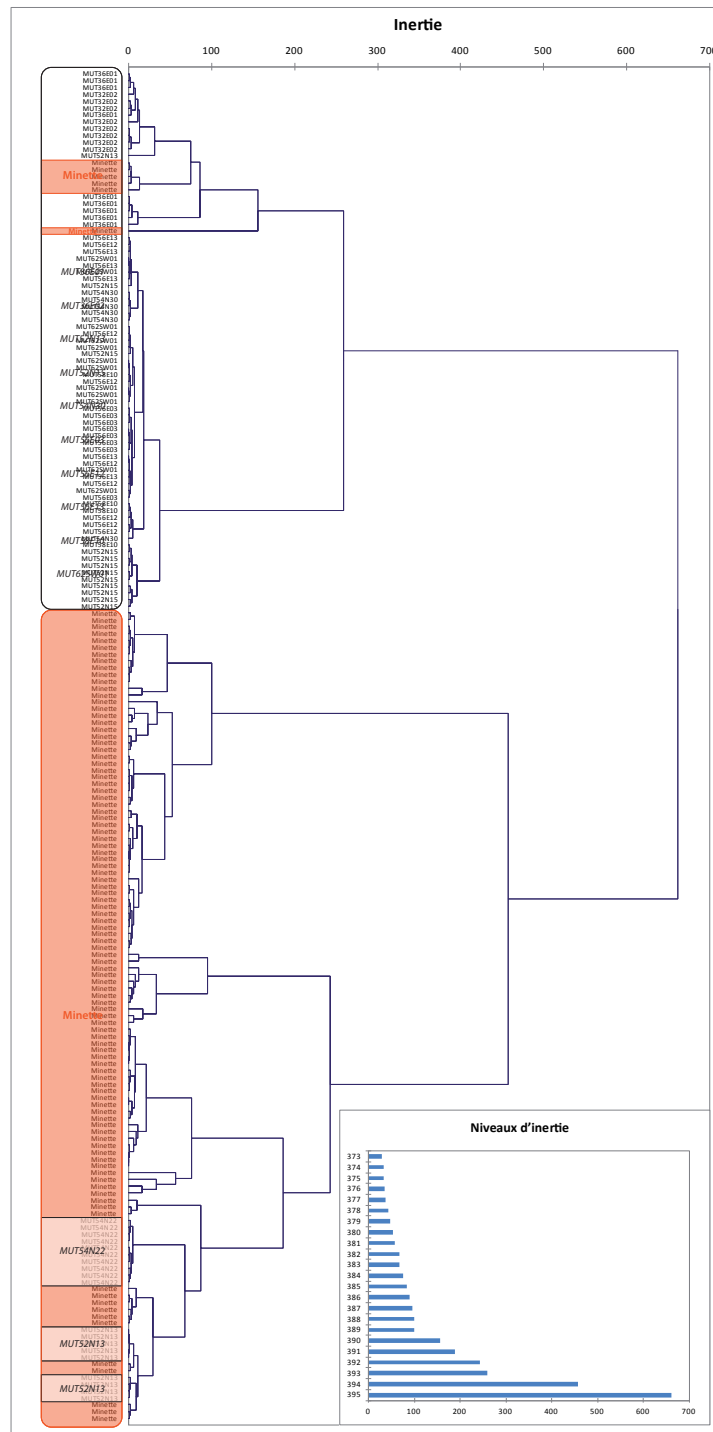


FIGURE 10. Dendrogramme présentant les résultats de la classification réalisée uniquement sur la classe associée à l'utilisation de la Minette lorraine et les inclusions des renforts ferreux de la tour de Mutte

nord-ouest de Metz. En effet, seuls ces deux secteurs du gisement de Minette ont, au vu des connaissances archéologiques et historiques, été exploités au Moyen Age. Ces régions viennent s'ajouter à la forge d'Orval, mentionnée dans les comptabilités, pour préciser le tableau de l'approvisionnement en fer de ce grand chantier messin : une fourniture locale, mais diversifiée. Enfin, ce constat soutient l'une des thèses développées à partir de l'examen des sources historiques, à savoir les liens établis entre les élites municipales messines et les autorités seigneuriales exerçant un contrôle sur les activités sidérurgiques développées sur les terres des comtes de Bar.

6. Conclusion

Cette contribution a présenté l'adaptation d'un certain nombre d'outils statistiques aux systèmes architecturaux et archéométrurgiques étudiés. Les réflexions développées ont trait à plusieurs champs d'application de l'outil statistique : préparation et exploration des données, description multivariée de l'information chimique, inférence statistique par analyses prédictives ou descriptives. L'utilisation de ces outils s'avère essentielle dans ce type de travail, au cours duquel un volume non négligeable de données numériques est acquis, décrivant des populations relativement importantes pour une étude manuelle exhaustive (de l'ordre de la centaine d'individus décrits chacun par de nombreuses variables).

L'affichage spatialisé des informations par le SIG s'est montré indispensable pour l'interprétation des résultats des analyses multivariées. Celui-ci a permis de mettre en évidence la cohérence de certains groupes de coulée de scellements de plomb, mais également l'emploi concomitant de renforts ferreux associés aux deux procédés sidérurgiques considérés. Le partitionnement des populations (scellements de plomb et renforts ferreux) offre par ailleurs la possibilité de simplifier les requêtes effectuées sur une base de données spatialisée, les classes définies par les analyses multivariées devenant des attributs qui synthétisent l'information portée par un nombre important de descripteurs, difficilement interrogeables en tant que tel.

Les approches statistiques employées apparaissent enfin comme un moyen incontournable pour aborder de manière concrète et chiffrée les questionnements archéologiques relatifs à la production et la circulation des métaux ferreux aux époques historiques. L'analyse prédictive mise en œuvre pour caractériser les filières techniques de réduction du fer offre ainsi un tableau inédit de la production métallurgique dans la région à la fin du XVe s, premier témoin concret des avancées techniques à mettre en regard des sources historiques. L'analyse non supervisée par CAH visant à déterminer la provenance du métal illustre quant à elle de manière concrète l'organisation des activités de production et d'échange du fer au sein du bassin sidérurgique lorrain utilisant la Minette Lorraine, au cours même d'une période de transition technologique. L'application de cette méthodologie est en cours sur d'autres régions d'études et permettra à plus long terme de démêler la complexité des marchés du fer aux époques anciennes.

Références

- Aitchison, J. (1982). The Statistical Analysis of Compositional Data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 44:139–177.
- Aitchison, J. (1986). *The statistical analysis of compositional data*. Chapman&Hall, London.
- Aitchison, J., Barcelo-Vidal, C. et Pawlowsky-Glahn, V. (2002). Some comments on compositional data analysis in archaeometry, in particular the fallacies in tangri and wright's dismissal of logratio analysis. *Archaeometry*, 44:295–304.
- Awty, B. G. (2007). The development and dissemination of the walloon method of ironworking. *Technology and culture*, 48:783–803.
- Baron, S., Arles, A. et L'Héritier, M. (2014). Le plomb : de son exploitation à son traçage dans les matériaux archéologiques et l'environnement. In Bellot-Gurlet, L. et Dillmann, P., éditeurs : *Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes*, pages 175–194. Editions des Archives Contemporaines, Paris.
- Baron, S. et Cochet, A. (2003). Étude d'un lot de lingots de plomb antiques des Saintes-Maries-de-la-Mer. Ségrégations et analyses chimiques élémentaires. *La Revue d'Archéométrie*, 27:147–163.
- Baxter, M. J. et Freestone, I. C. (2006). Log-Ratio Compositional Data Analysis In Archaeometry. *Archaeometry*, 48:511–531.
- Bernardi, P. et Dillmann, P. (2002). La place du métal dans la construction.
- Bernardi, P. et Dillmann, P. (2005). Stone skeleton or iron skeleton : The provision and use of metal in the construction of the Papal Palace at Avignon in the 14th century. In Bork, R., éditeur : *De Re Metallica. The uses of metal in the Middle Ages.*, volume 4, pages 297–315. ASHGATE.
- Casarotto, J.-T., Leroy, M., Merluzzo, P. et Ploquin, A. (1996). L'utilisation du minerai oolithique et le développement de la sidérurgie ancienne avant le haut fourneau. In *Lorraine du feu, Lorraine du fer. Révolutions industrielles et transformation de l'espace mosellan (XVIIe-XIXe siècle)*, pages 59–71. Conseil Général de la Moselle, Archives Départementales de la Moselle, Saint-Julien-les-Metz.
- Charlton, M., Blakelock, E., Martínón-Torres, M. et Young, T. (2012). Investigating the production provenance of iron artifacts with multivariate methods. *Journal of Archaeological Science*, 39:2280–2293.
- Coustures, M.-P., Béziat, D. et Tollon, F. (2003). The use of trace element analysis of entrapped slag inclusions to establish ore-bar iron links : examples from two gallo-roman iron-making sites in France (Les Martys, Montagne Noire, and Les Ferrys, Loiret). *Archaeometry*, 45:599–613.
- Deffressigne, S., Tikonoff, N., Boulanger-Bouchet, K., Chaussé, C. et Tesnier-Hermetey, C. (2002). Les gisements d'habitat de la fin du premier âge du fer à Gondreville - Fontenoy-sur-Moselle (54). Le stockage intensif et ses conséquences économiques et sociales. *Archeologia Mosellana*, 4:81–184.
- Desaulty, A.-M. (2008). *Apport des analyses chimiques multi technique à la compréhension du comportement des éléments traces dans les filières sidérurgiques anciennes. Application aux études de provenance et à la distinction des procédés. Le cas du Pays de Bray normand*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, Belfort.
- Desaulty, A.-M., Dillmann, P., L'Heritier, M., Mariet, C., Gratuze, B., Joron, J.-L. et Fluzin, P. (2009). 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*, 36:2445–2462.
- Dillmann, P., Fluzin, P. et Benoit, P. (1996). Du fer à la fonte, Nouvelles approches archéométriques. pages 160–168, Paris. ERRANCE.
- Dillmann, P. et L'Héritier, M. (2007). Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings : supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science*, 34:1810–1823.
- Disser, A. (2014). *Production et circulation du fer en Lorraine (VIe s. av. J.-C. - XVe s. ap. J.-C.)*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Belfort.
- Disser, A., Dillmann, P., Bourgain, C., L'Héritier, M., Vega, E., Bauvais, S. et Leroy, M. (2014). Iron reinforcements in Beauvais and Metz Cathedrals : from bloomery or finery ? The use of logistic regression for differentiating smelting processes. *Journal of Archaeological Science*, 42:315–333.
- Disser, A., Dillmann, P., Leroy, M., L'Héritier, M., Bauvais, S. et Fluzin, P. (2016). Iron supply for the building of Metz cathedral : new methodological development for provenance studies and historical considerations. *Archaeometry*, 58.
- Fluzin, P. (1983). Notions élémentaires de sidérurgie. In ECHARD, N., éditeur : *Métallurgies africaines. Nouvelles*

- contributions*, pages 13–44. Musée de l'Homme, Paris.
- Fluzin, P. (2002). La chaîne opératoire en sidérurgie : matériaux archéologiques et procédés .Apports des études métallographiques. *In Aux origines de la métallurgie du fer en Afrique*, pages 58–92. Editions de l'UNESCO-BPI.
- Gelman, A. et Su, Y.-S. (2015). Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models. *In R : A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna.
- Gillard, A. (1971). *L'industrie du fer dans les comtés de Namur et de l'Entre-Sambre-Et-Meuse de 1345 à 1600*. Bruxelles.
- Gille, B. (1978). *Histoire des Techniques : technique et civilisations, technique et sciences*. Gallimard, Paris.
- Girardot, A. (1970). Forges princières et forges monastiques, coup d'oeil sur la sidérurgie lorraine aux XIIe et XIIIe siècles. *Revue d'Histoire des Mines et de la Métallurgie*, 2:3–20.
- Gratuze, B., Blet-Lemarquand, M. et Barrandon, J.-N. (2001). Mass spectrometry with laser sampling : A new tool to characterize archaeological materials. *Journal of Radionalytical and Nuclear Chemistry*, 247:645–656.
- Husson, F., Lê, S. et Pagès, J. (2016). *Analyse de données avec R, 2ème édition revue et augmentée*. Presses Universitaires de Rennes, Rennes.
- Jacob, V. (1864). *Recherches historiques sur la tour et la cloche de Mutte de la cathédrale de Metz*. Metz.
- Kuhn-Mutter, M.-A. (1994). *La Cathédrale de Metz : des pierres et des hommes*. Editions Serpenoise, Metz.
- Leroy, M. (1997). *La sidérurgie ancienne en Lorraine avant le haut-fourneau. Etude du développement historique et des conditions techniques de l'utilisation du minerai oolithique lorrain (la minette) en métallurgie de réduction directe*, volume 18 de *Monographies du CRA*. Edition du CNRS, Paris.
- Leroy, M. (1998). Autour de la « minette » : la perduration de la production de fer en bas-fourneau en Lorraine à la fin du Moyen Age. *In Beck, P., éditeur : L'innovation Technique Au Moyen Age : Actes Du VIe Congrès International D'archéologie Médiévale*, Paris. Errance.
- Leroy, M. et Merluzzo, P. (1998). *Les ateliers sidérurgiques médiévaux de Saint-Dizier (Haute-Marne)*. Numéro 91.
- Leroy, M., Merluzzo, P. et Le Carlier, C. (2015a). *Archéologie du fer en Lorraine. Minette et production du fer en bas fourneaux dans l'Antiquité et au Moyen-Age*.
- Leroy, S., Cohen, S. X., Verna, C., Gratuze, B., Téreygeol, F., Fluzin, P., Bertrand, L. et Dillmann, P. (2012). The medieval iron market in Ariège (France). Multidisciplinary analytical approach and multivariate analyses. *Journal of Archaeological Science*, 39:1080–1093.
- Leroy, S., L'Héritier, M., Delqué-Kolic, E., Dumoulin, J.-P., Moreau, C. et Dillmann, P. (2015b). Consolidation or initial design ? Radiocarbon dating of ancient iron alloys sheds light on the reinforcements of French Gothic Cathedrals. *Journal of Archaeological Science*, 53:190–201.
- Leypold, D. (1996). *La métallurgie du fer dans le massif vosgien, la vallée de la Bruche, de l'Antiquité au XIXe siècle*. Numéro 55 de Recherches et documents. Strasbourg.
- L'Héritier, M. (2007). *L'utilisation du fer dans l'architecture gothique. Les cas de Troyes et de Rouen*. Archéologie, Sorbonne, Paris.
- L'Héritier, M., Arles, A., Disser, A. et Gratuze, B. (2016). Lead it be ! Identifying the construction phases of gothic cathedrals using lead analysis by LA-ICP-MS. *Journal of Archaeological Science : Reports*, 6:252–265.
- L'Héritier, M., Baron, S., Cassayre, L. et Téreygeol, F. (2015). Bismuth behaviour during ancient processes of silver-lead production. *Journal of Archaeological Science*, 57:56–68.
- L'Héritier, M., Dillmann, P., Aumard, S. et Fluzin, P. (2013). Iron ? Which iron ? Methodologies for metallographic and slag inclusion studies applied to ferrous reinforcements from Auxerre Cathedral. *In Humphris, J. et Rehren, T., éditeurs : World of Iron*, pages 409–420, London.
- L'Héritier, M., Dillmann, P. et Benoit, P. (2010). Iron in the building of gothic churches : its role, origins and production using evidence from Rouen and Troyes. *Historical Metallurgy*, 44:21–35.
- L'Héritier, M., Dillmann, P., Timbert, A. et Bernardi, P. (2012). The role of iron armatures in gothic constructions : reinforcement, consolidation or commissioner's choice. *In Carvais, R., Guillaume, A., Nègre, V. et Sakarovitch, J., éditeurs : Nuts and bolt of construction history. Culture, technology and society. Vol. 2*. Picard, Paris.
- Mangin, M. (1993). *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen. Archéologie et archéométrie. Colloque de Besançon*. Numéro 536 de Annales Littéraires de l'Université de Besançon. Les Belles Lettres, Paris.
- Pagès, G., Dillmann, P., Fluzin, P. et Long, L. (2011). A study of the roman iron bars of Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône, France). A proposal for a comprehensive metallographic approach. *Journal of Archaeological Science*, 38:1234–1252.
- Pleiner, R. (2000). *Iron in Archaeology The european bloomery smelters*. Archeologicky Ustav av Cr, Prague.

- Schneider, Jean (1950). *La ville de Metz aux XIIIe et XIVe siècles*. Imprimerie Thomas, Nancy.
- Serneels, V. (1993). *Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale*, volume 61 de *Cahiers d'Archéologie Romande*. Lausanne.
- Taupin, J.-L. (1996). Le fer dans les cathédrales. *Monumental*, 13:18–27.
- Tibshirani, R., Walther, G. et Hastie, T. (2001). Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Statistical Methodology)*, 63(2):411–423.
- Timbert, A. (2009). *L'homme et la matière : l'emploi du plomb et du fer dans l'architecture gothique. actes du colloque, Noyon, 16-17 novembre 2006*. Picard, Paris.