Le fer et le plomb de la cathédrale Saint-Guy de Prague (République tchèque)

Première approche et étude archéométrique

Maxime L'HÉRITIER(1),
Philippe DILLMANN(2), Guillaume SARAH(3)

(1) Université Paris 8, ArScAn UMR7041 CNRS
(2) IRAMAT-LAPA UMR7065 CNRS et NIMBE UMR3685 CEA/CNRS
(3) IRAMAT-CEB UMR7065 CNRS

DOI : https ://doi.org/10.17184/eac.9899

Résumé : Si l'usage des métaux dans la construction médiévale a fait l'objet de nombreuses études depuis plus d'une vingtaine d'années, la plupart d'entre elles concernent des monuments situés au sein du royaume de France ou dans des régions limitrophes. Pourtant, de nombreux édifices comme la cathédrale de Prague font un très large usage du fer et du plomb dans leur construction. Le présent article vise à offrir un premier point de comparaison en République tchèque aux études entreprises jusqu'à présent sur le territoire français afin de traiter plus avant les questions de qualité et de provenance des métaux grâce à l'analyse de plusieurs prélèvements réalisés sur la cathédrale Saint-Guy. Les résultats de cette étude révèlent notamment que, si les qualités de fers mis en œuvre semblent comparables à celles déjà analysées sur d'autres monuments, la composition des plombs semble bien distincte.

Abstract: Although the use of metals in medieval construction has been the subject of numerous studies over the past twenty years, most of them concern monuments located within the Kingdom of France or in neighbouring regions. However, many buildings, such as Prague Cathedral, make extensive use of iron and lead in their construction. This article aims to offer an initial comparison in the Czech Republic with studies undertaken to date in France in order to further address issues of metal quality and provenance through the analysis of several samples taken from St. Vitus Cathedral. The results of this study reveal in particular that, while the quality of the iron used appears to be comparable to that already analysed on other monuments, the composition of the lead appears to be quite distinct.

1 Introduction

Les études menées depuis près d'une trentaine d'années ont révélé la place cruciale des métaux dans l'architecture de la période gothique[1], récemment mise en exergue avec le cas de Notre-Dame de Paris, dont l'incendie a contribué à mettre au jour des usages encore inconnus du fer et du plomb (L'Héritier 2019 ; L'Héritier *et al.* 2023 ; Syvilay *et al.* 2024).

Le fer est notamment utilisé par les bâtisseurs dans un rôle structurel sous forme d'agrafes, de tirants ou de chaînages ou de plus petites pièces pour attacher une partie du décor gothique. Le plomb, quant à lui, sert d'une part à sceller les fers et parfois les pierres, apportant au bâti cohésion et souplesse. Son bas point de fusion (327 °C) facilite sa mise en œuvre par une fonte et un coulage en place et sa grande malléabilité permet au bâti d'encaisser certains tassements et déformations. D'autre part, sous forme de grandes tables, il revêt également une fonction d'étanchéité pour les chéneaux et parfois pour les couvertures de certains de ces grands monuments, se doublant alors d'une fonction symbolique (Daussy, 2015). Enfin, et non moins symbolique, il entre dans la composition de certains décors, parfois soutenus par une armature de fer.

À partir des années 2000, la recherche a intégré des études matérielles, d'abord sur le fer, puis sur le plomb, pour tenter d'évaluer la qualité des matériaux employés par les bâtisseurs et restituer leur chronologie de mise en œuvre ou leur provenance (L'Héritier 2019). Si les monuments étudiés dans cette optique sont majoritairement issus du royaume de France, berceau de l'architecture gothique, l'usage du métal n'est évidemment pas restreint à ce seul territoire. C'est notamment le cas de la cathédrale Saint-Guy de Prague, fondée en 1344 par un maître d'œuvre français, Mathieu d'Arras. L'enjeu de cet article est d'offrir un premier point de comparaison aux études entreprises jusqu'à présent sur le territoire français afin d'appréhender en particulier les questions de qualité et de provenance des métaux en tenant compte d'un plus large cadre géographique.

2 Contexte

Fondée en 1344, l'actuelle cathédrale gothique Saint-Guy de Prague est l'œuvre de Mathieu d'Arras, architecte français du Palais des papes d'Avignon. Il conçut le plan général de l'édifice, mais ne put construire que les parties les plus orientales du chevet : les grandes arcades et le déambulatoire. Après sa mort en 1352, le chantier est repris en main par un nouveau maître d'œuvre, Peter Parler. Il travailla d'abord d'après les plans laissés par son prédécesseur, puis d'après ses propres plans. À la mort de Peter Parler, en 1397, le chevet et une partie du transept étaient achevés. Ses fils, Wenzel Parler et Johannes Parler, poursuivirent l'œuvre et un certain maître Petrilk leur succéda. Sous ces trois maîtres, le transept et la grande tour du côté sud sont achevés ainsi que le pignon reliant la tour au transept sud. L'ensemble du processus de construction s'arrête avec le début de la guerre hussite dans la première moitié du

[1] Voir par exemples les études fondatrices de Marc Férauge et Pascal Mignerey (Férauge et Mignerey 1996) ou J.-L. Taupin (Taupin 1996), avec la collaboration de Ph. Fluzin.

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984

XV^e siècle. Les parties occidentales, y compris la nef et le portail, ne sont achevées qu'aux XIX^e et XX^e siècles.

3 Matériel et méthodes

3.1 Le fer dans la cathédrale de Prague

La cathédrale de Prague fait un assez large usage du fer dans sa construction, notamment dans le chevet gothique, où se retrouvent plusieurs séries d'armatures de fer, en particulier aux étages du triforium et des baies hautes.

La galerie de circulation du triforium est pour sa part constituée d'une série de colonnes, supportant l'étage des fenêtres hautes et d'une balustrade en léger encorbellement. Les colonnes sont renforcées par des tirants de fer de section subcarrée ancrés au sommet du fût, à la base du chapiteau, reliant ainsi les colonnettes d'une même travée entre elles (Figure 1). Si la continuité de chaque tirant semble évidente au sein d'une travée, comme le révèle leur parfait alignement, leur liaison dans les piles entre les travées formant alors un véritable chaînage n'a pour sa part pas été examinée. Des agrafes d'une trentaine de centimètres de long sont également présentes au sol du triforium, de manière transversale pour solidariser le support d'une structure en encorbellement (Figure 1). On note également la présence d'agrafes sur certaines balustrades, notamment au niveau des transepts. L'ensemble de ces fers est scellé au plomb.

Au niveau des baies hautes, on dénombre trois barlotières-tirants dans chaque fenêtre (Figure 2). Ces barlotières mesurent la longueur d'une baie et apportent un soutien au réseau de la fenêtre en plus de permettre l'attache du vitrail. À Prague, elles possèdent en outre la particularité de ne pas s'ancrer au sein des maçonneries, mais d'être reliée par un système de crochet, préalablement ancré dans le piédroit. Un tel dispositif a déjà pu être observé à certains endroits à la cathédrale de Tours (thèse en cours de Sarah Prodhon), mais semble ici systématique. Il ne garantit toutefois pas la continuité du système par chaînage. En effet, rien n'indique que les crochets sont continus au sein d'une pile. Ce dispositif permet en revanche de conférer un caractère amovible à ces grandes barlotières, qui ne sont plus liées aux piédroits. Il facilite en outre leur mise en œuvre, permettant de monter le cadre de la fenêtre séparément de son remplage, toutes armatures de fer comprises.

Des tirants traversant le vaisseau principal sont visibles sous les voûtes du chevet (Figure 1). Au niveau de chaque travée, deux tirants situés l'un au-dessus de l'autre s'ancrent dans la nervure médiane (correspondant au doubleau sur une voûtement non entrelacé). Leur morphologie, avec des assemblages en trait de Jupiter et leur mise en œuvre, suggèrent toutefois un ajout tardif.

Enfin, dix goujons de fer, certains scellés au plomb, ont été mis au jour dans les parties supérieures à l'extérieur du chevet (Figure 3), lors d'une campagne de restauration menée en 2011 où ils servaient à attacher des éléments de décor : sept goujons de section plate (PRA 04 à PRA 10 d'environ 1,5-1,8 cm x 1 cm), un plus gros goujon de section subcarrée (PRA 01, 2,2x2,5 cm environ), un plus fin (PRA 02, 1x1,2 cm environ) et, un autre, fin en forme de T (PRA 03, section carrée 0,6-1 cm environ).

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984

Tous possèdent des barbelures, permettant au plomb ou au mortier de mieux accrocher au fer. La plupart de ces goujons dateraient de l'édification de la cathédrale à l'époque gothique, tandis que d'autres ont probablement été mis en œuvre lors des restaurations du XIX^e siècle (Tableau 1). C'est le cas des deux goujons fins (PRA 02 et 03), dont la forme des barbelures, plus grossières que pour les autres, évoque des fers plus récents. Le plus gros goujon carré (PRA 01) est également supposé provenir d'une restauration à cause de ses différences morphologiques.



FIG. 1 : Galerie du triforium de la cathédrale de Prague et ses armatures de fer : tirants en élévation (à gauche) et agrafes au sol (à droite).



FIG. 2 : Baies hautes de la cathédrale de Prague et leurs barlotières-tirants.

3.2 Corpus d'analyse

Le corpus de l'étude archéométrique est constitué de six goujons parmi ceux prélevés lors de la campagne de restauration de 2011. Les cinq goujons scellés au plomb provenant des campagnes gothiques ont été sélectionnés afin d'étudier les deux matériaux conjointement. Seul, le plus gros goujon, PRA 01 possiblement issu des campagnes de restauration du XIX^e siècle, a également été analysé à titre de comparaison. Cinq coupes longitudinales et une coupe transversale ont été réalisées. Tous les fragments de plomb disponibles ont également été analysés.

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984

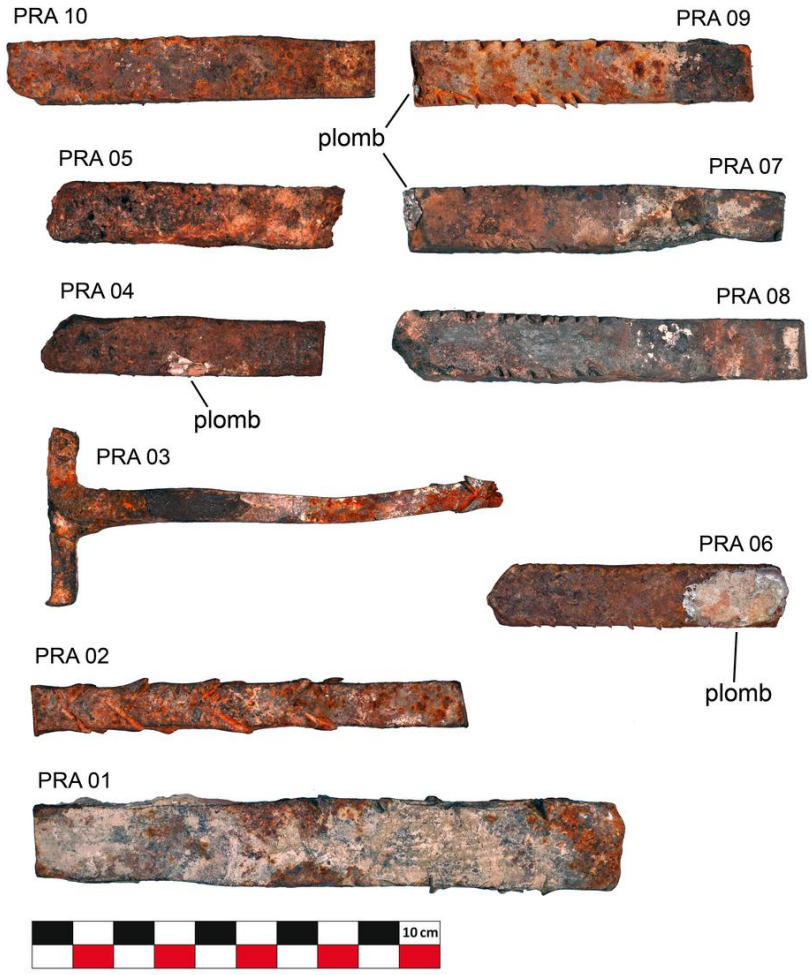


Fig. 3 : Les faces principales des goujons de fer de la cathédrale de Prague considérés dans l'étude.

3.3 Méthodes

Les échantillons de fer ont été montés dans une résine époxy et polis à l'aide de papier abrasif SiC (grain 80 à 1200) et puis par un polissage diamanté de 9, 3 et 1 micron. Une première observation a été effectuée sur l'échantillon à l'aide d'un microscope optique, puis une seconde après attaque au réactif Nital permettant de révéler les carbures de fer. Ensuite, après repolissage, des analyses de la composition principale des inclusions ont été effectuées en utilisant la spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS) couplée à un microscope électronique à balayage (MEB). Dans la mesure du possible, une quarantaine d'inclusions ont été analysées par échantillon pour vérifier l'homogénéité des rapports des Composés Non Réduits (CNR, c'est-à-dire Al_2O_3,

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984

SiO_2, MgO, CaO, K_2O) et placer chaque échantillon dans l'abaque de discrimination des procédés de réduction, directe ou indirecte (Dillmann & L'Héritier 2007). Si un nombre insuffisant de grandes inclusions était disponible, alors les plus grandes ont été analysées jusqu'à une surface de 20 microns carrés. Parmi ces inclusions de scories analysées au MEB-EDS, une douzaine d'inclusions de grandes dimensions (> 80 + de large) et dont la composition est liée à la signature chimique du minerai ont été sélectionnés pour l'analyse des éléments traces par LA-ICP-MS (Disser *et al.* 2017 ; Leroy *et al.* 2012 ; L'Héritier *et al.* 2016b).

Les analyses par SEM-EDS ont été réalisées au Laboratoire Archéomatériaux et Prévision de l'Altération à Saclay (SIS2M CEA/CNRS UMR3299 & IRAMAT CNRS UMR 7065) sur un MEB Cambridge Stereoscan 120 couplé à un détecteur Si(Li) avec une fine fenêtre en béryllium et une chaîne d'acquisition numérique, ce qui permet de détecter et de quantifier avec une bonne précision des éléments relativement légers, tels que l'oxygène. Les mesures ont été effectuées avec une tension d'accélération de 15 kV.

Les analyses LA-ICP-MS ont été réalisées au Centre Ernest-Babelon à Orléans (IRAMAT CNRS UMR 7065) avec un spectromètre de masse Element XR de Thermofisher Instrument et un dispositif d'ablation par microsonde UV VG (Nd :YAG à quadruple fréquence permettant d'opérer à 266 nm).

4 Résultats

4.1 Métallographie

Tous les échantillons de fer présentent peu d'inclusions de scories dans leur matrice métallique. Les taux d'inclusions sont compris entre 0,5 et 2,5 %, ce qui les situe entre une excellente propreté et une propreté moyenne si on compare ces résultats avec l'ensemble des fers de construction étudiés jusqu'ici sur le territoire français (L'Héritier *et al.* 2019). La plupart de ces inclusions sont cristallisées et présentent une structure biphasée avec des dendrites de wüstite (FeO) qui se sont développées dans une matrice fayalitique (Fe_2SiO_4) ce qui est habituel pour les fers anciens.

L'attaque Nital révèle pour sa part que ces alliages ferreux sont relativement peu carburés, soit totalement ferritique, soit avec une matrice un peu plus hétérogène en carbone. Deux d'entre eux (PRA 04 et PRA 09) ne dépassent pas 1 % de surface carburée. Pour PRA 04, seule une de ses faces est carburée, révélant peut-être une cémentation involontaire au contact du charbon dans le foyer de forge. Sur les autres échantillons, la surface carburée est comprise entre 15 et 38 %. Sur la plupart, la teneur en C est variable, allant par endroits jusqu'à la composition de l'eutectoïde. Les surfaces carburées prennent la forme de bandes parallèles au sens de la longueur de l'objet (Figure 4), témoignant de l'allongement à la forge d'une matrice métallique initialement hétérogène. Les grains de ferrite sont de taille variable, allant de quelques dizaines à une centaine de microns. Aucune structure fantôme n'a pu être relevée sur les échantillons témoignant de la présence de phosphore. Enfin, une ligne de soudure (Figure 4) est visible au milieu de l'échantillon PRA 05, assemblant deux matériaux de composition distincte (carburé et moins carburé).

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984

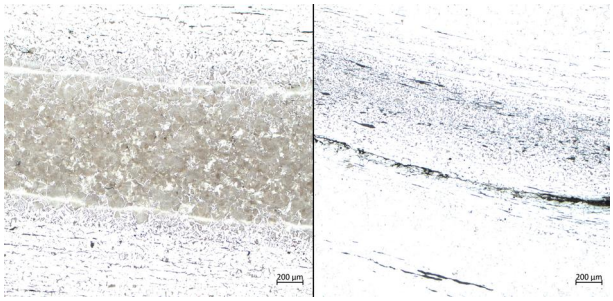


FIG. 4 : Bandes de carburations différentes (PRA 01 à gauche) et soudure (PRA 05 à droite).

4.2 Analyse chimique des inclusions

D'après l'analyse des éléments majeurs, la plupart des inclusions semblent provenir de la phase de réduction, car les rapports des composés non réduits (CNR) sont assez constants pour chaque échantillon, même en cas de soudure. Certains échantillons (PRA 04 & PRA 07) semblent toutefois présenter des rapports différents des autres, ce qui pourrait mettre en évidence une origine différente, qui sera discutée par l'analyse des éléments traces. On note en outre qu'aucun échantillon ne possède de teneurs importantes en MnO (< 0,5 %) et que quatre d'entre eux ont des teneurs modérées en phosphore (P_2O_5moy < 5 %), les deux autres (PRA 04 et PRA 05) en étant totalement dépourvus (Tableau 1).

TAB. 1 : Teneurs moyennes pondérées en éléments majeurs des inclusions des échantillons de fer de la cathédrale de Prague (résultats en %).

Échantillon	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	FeO
PRA 01	< 0,5	1,5	4,2	22	2,7	1,1	2,3	< 0,5	< 0,5	65
PRA 04	< 0,5	0,9	4,4	38	< 0,5	2,1	2,5	< 0,5	0,5	51
PRA 05	1	3,4	10	55	< 0,5	3,1	6,2	0,5	< 0,5	20
PRA 06	< 0,5	1,5	4,2	24	3,6	1,3	2,4	< 0,5	< 0,5	62
PRA 07	0,6	1,2	4,7	22	1,7	1,1	2	< 0,5	< 0,5	66
PRA 09	0,5	2,2	4,6	26	4,1	1,3	2,7	< 0,5	< 0,5	58

Selon l'abaque de discrimination du procédé de réduction (Figure 5) (DILLMANN & L'HÉRITIER, 2007), tous les échantillons ont été fabriqués avec du fer produit en bas fourneau selon le procédé de réduction direct. Ce résultat était attendu pour des échantillons provenant des campagnes gothiques (XIV^e s.) à une époque où les hauts fourneaux n'étaient pas encore largement répandus en Europe centrale (CUCINI & TIZZONI, 2022 ; PETRIK *et al.* 2022). En revanche, il est plus surprenant pour l'échantillon PRA 01 dont la datation supposée remonte au XIX^e s., à une époque où les hauts fourneaux et affineries ont totalement remplacé les anciens bas fourneaux de réduction directe sur la plus grande partie de l'Europe. Soit il s'agit d'un réemploi soit la restauration sur cette partie de l'édifice au XIX^e s. n'a pas été aussi importante qu'initialement supposé.

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984

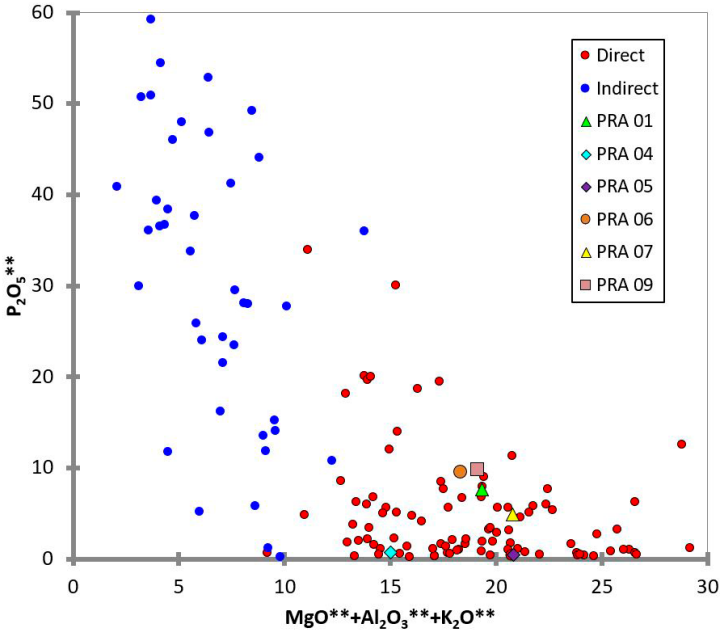


Fig. 5 : Comparaison des échantillons de fer de la cathédrale de Prague avec le référentiel de réduction directe et de réduction indirecte.

La composition en éléments traces des inclusions de scories montre clairement que l'échantillon PRA 04 a une signature chimique différente des autres échantillons (Figure 6). L'utilisation de méthodes statistiques multivariées ne permet cependant pas de distinguer les autres groupes d'échantillons (Disser *et al.* 2017 ; Leroy *et al.* 2012 ; L'Héritier *et al.* 2020). Les échantillons PRA 01, 05, 06, 07 et 09 sont donc susceptibles de partager une même origine. Leur teneur en tungstène (W) est tout à fait remarquable, atteignant 50-150 ppm, soit environ dix fois plus que ce qui a été mesuré pour les fers de construction des monuments du royaume de France. En raison de son comportement sidérophile lors de la réduction du minerai dans un four de réduction directe (Desaulty *et al.* 2009), cet élément est plus susceptible de migrer depuis le minerai dans la phase d'oxyde de fer pur (wüstite, FeO) que dans la phase silicatée. Cette caractéristique est en bonne corrélation avec les observations métallographiques des échantillons de Prague, car la teneur en W semble beaucoup plus élevée dans les inclusions pauvres en fayalite, c'est-à-dire à faible teneur en SiO_2.

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984

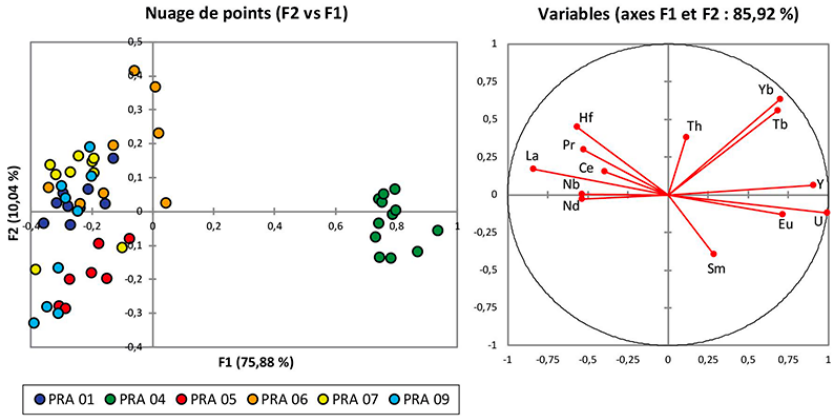


FIG. 6 : Analyse en composantes principales (ACP) sur les teneurs en Xij des inclusions des goujons de fer (1 pt = 1 inclusion) d'après LEROY *et al.* 2012.

4.3 Analyse chimique des plombs

L'analyse des plombs révèle de fortes quantités de bismuth (200-500 ppm), teneurs caractéristiques d'un plomb non affiné (L'HÉRITIER *et al.* 2015 ; PERNICKA & BACHMANN, 1983). En effet, le bismuth se concentre dans l'argent lors de la coupellation et n'est donc pas présent dans les premières litharges susceptibles d'être revivifiées en plomb métallique. De plus, les concentrations en argent de ces plombs (175-460 ppm) sont bien supérieures à celles mesurées jusqu'ici sur d'autres plombs de construction (généralement en deçà de 200 ppm et fréquemment autour de 100 ppm ou moins (L'HÉRITIER *et al.* 2016 ; SYVILAY *et al.* 2015, 2024), ce qui semble compatible avec ces observations. Rappelons en outre que la teneur en argent résiduelle d'un plomb après désargentation est estimée à environ 100 ppm par certains auteurs (REHREN & PRANGE, 1998). Les fortes concentrations soit en cuivre (1000-17000 ppm), soit en antimoine (1000-7000 ppm), voire les deux pour PRA 04 qui ne contient que 97 % de plomb confirment cette observation. Ces éléments sont en effet également expurgés en tout début de coupellation et ne sont donc pas concentrés dans les litharges. L'antimoine forme en outre des composés bien identifiables lors de cette opération (L'HÉRITIER *et al.* 2015). La teneur en argent de ces plombs était probablement trop faible pour que son extraction soit rentable, mais elle est étonnamment élevée (200-500 ppm) par rapport aux minerais pauvres en plomb (REHREN & PRANGE 1998). Il faut donc supposer que du plomb ayant une teneur en argent beaucoup plus élevée était couramment disponible pour l'extraction de l'argent dans les gisements de minerais disponibles sur ce territoire.

La comparaison des compositions des plombs entre eux semble en revanche trop hasardeuse, étant donné le faible nombre d'échantillons pour tirer de quelconques conclusions.

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984

Tab. 2 : Teneurs en éléments traces dans les plombs de scellement de la cathédrale de Prague (résultats en ppm sauf Pb).

Échantillon	Pb (%)	Ni	Cu	As	Pd	Ag	Cd	Sn	Sb	Au	Bi
PRA 04	96,90%	348	17497	90	0,9	275	2	7168	7702	0,1	431
PRA 05	99,70%	13	607	16	0	175	2	70	1994	0,3	216
PRA 06	99,70%	40	1434	0	0,1	462	1	370	356	0	546
PRA 07	99,80%	3,2	512	2	0	240	1	394	971	0	268
PRA 09	99,80%	25	1056	6	0	305	2	0,2	240	0	424

5 Discussion

Les analyses d'échantillons de fer et de plomb provenant des campagnes de construction gothiques de la cathédrale de Prague révèlent à la fois des traits communs avec les édifices étudiés jusqu'à présent et des caractéristiques spécifiques.

La qualité des armatures en fer mis en œuvre semble en tous points comparable à celle des éléments disponibles dans la littérature (L'Héritier *et al.* 2019). Aucune qualité de fer spécifique n'a été utilisée à Prague, comme pour la plupart des monuments étudiés jusqu'ici, à de rares exceptions près, comme le Palais des papes d'Avignon (Bernardi & Dillmann, 2005). En outre, tous les échantillons analysés ont été fabriqués avec du fer obtenu par le procédé de réduction directe, même ceux provenant manifestement des campagnes du XIX^{e} siècle. Cela soulève la question du réemploi du métal ou invite à reconsidérer l'impact des restaurations du XIX^{e} siècle sur le chevet de la cathédrale. Enfin, en ce qui concerne l'approvisionnement du chantier de la cathédrale, tous les échantillons sauf un (PRA 04) sont susceptibles de provenir d'une même région de production caractérisée par d'importantes concentrations en W. Les quantités de métal représentées par ces quelques goujons est certes réduite, mais la comparaison avec les sources historiques disponibles serait ici riche d'enseignements (Suchý, 2016). Concernant la provenance du métal, ces teneurs en W pourraient être un premier indice pour retrouver des sources potentielles de minerai de fer.

Le plomb de construction mis en œuvre à la cathédrale de Prague pour sceller les goujons de fer est en revanche très différent du plomb analysé jusqu'à présent dans les monuments gothiques français (L'Héritier *et al.* 2016a ; Syvilay *et al.* 2024, 2015), généralement très pur (à l'exception de teneurs en étain parfois importantes) avec une très faible concentration de bismuth (quelques dizaines de ppm) et une faible proportion d'argent (aux alentours de 100 ppm), correspondant plutôt à des plombs désargentés. À Prague, le plomb est riche en argent et en bismuth et ne semble pas avoir été affiné. Ce résultat original interroge par conséquent sur l'origine du plomb employé sur ce chantier. Une hypothèse pourrait être qu'il s'agit de plomb de rebut provenant des mines d'argent, écarté de la chaîne de production en raison de sa faible concentration en argent. Une telle hypothèse paraît séduisante dans le contexte local et régional. En effet, au XIV^{e} siècle, les mines de Kutna Hora exploitées par le roi de Bohème s'appuient sur un gisement d'une richesse considérable qui en fait la mine la plus productive d'Europe, de laquelle on extrait jusqu'à 20 t d'argent par an (Spufford, 1988). La production d'argent à partir de galène argentifère, un sulfure de plomb, conduit également à une production très importante de plomb (Benoit, 1997). Or,

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984

l'ensemble des filons disponibles, de richesse nécessairement inégale, n'étaient peut-être pas tous exploités pour l'argent. Une enquête dans les sources écrites disponibles est ici également indispensable pour fournir des informations à ce sujet et corroborer ces hypothèses, mais surtout, l'analyse isotopique pourrait éventuellement permettre de relier ces plombs à ces grandes mines de la région.

6 Conclusion

Ces premières analyses de métaux utilisés dans l'architecture gothique d'un grand monument gothique d'Europe centrale livrent de premiers résultats qui ouvrent plusieurs perspectives de recherche. Comme en Europe occidentale, les métaux participent de l'élévation de ces grandes églises, dont ils sont une des composantes indispensables. Toutefois, la nature de ces métaux diffère sensiblement des références connues jusqu'ici. Leurs circuits d'approvisionnement semblent en effet s'appuyer sur des ressources aux caractéristiques bien distinctes des productions des royaumes d'Europe occidentale étudiés jusqu'à présent. Une approche isotopique des plombs et une étude archéologique et archéométrique régionale des structures de production de fer existantes à la fin du Moyen Âge dans la région seraient nécessaires pour mieux comprendre ces réseaux d'échanges, leurs caractéristiques et leurs contraintes.

Bibliographie

Benoit, P., 1997. La mine de Pampailly, XV^{e}-XVIII^{e} siècle, DARA. Alpara, Lyon.

Bernardi, Ph., Dillmann, Ph., 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* R. Bork (dir.). De Re Metallica the Uses of Metal in the Middle Ages. Ashgate, 297-315.

Cucini, C., Tizzoni, M., 2022. The Lombard Iron Masters Migrations and the Spread of the Blast Furnace in Europe, with a Focus on the 16th-17th Centuries. METALLA 26 : 37-66.

Daussy, S.D., 2015. Quanto cultu auroque Templa fulgerent. Toitures et beauté de la vision comme expression des pouvoirs. Hortus Artium Medievalium 21, 273-283.

Desaulty, A.-M., Dillmann, Ph., L'Héritier, M., Mariet, Cl., Gratuze, B., Joron, J.-L., Fluzin, Ph., 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, Ph., 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., Dillmann, Ph., Leroy, M., L'Héritier, M., Bauvais, S., Fluzin, Ph., 2017. Iron Supply for the Building of Metz Cathedral : New Methodological Development for Provenance Studies and Historical Considerations. Archaeometry 59 : 493-510. https://doi.org/10.1111/arcm.12265

Férauge, M., Mignerey, P., 1996. La cathédrale de Bourges et l'utilisation du fer dans l'architecture. Bulletin Monumental 154 : 129-148.

Leroy, St., Cohen, S.-X., Verna, C., Gratuze, B., Téreygeol, Fl., Fluzin, P., Bertrand, L., Dillmann, P., 2012. The medieval iron market in Ariège (France). Multidisciplinary analytical approach and multivariate analyses. Journal of Archaeological Science 39, 1080-1093.

L'Héritier, M., 2019. Le fer et le plomb dans la construction monumentale au Moyen Âge, de l'étude des sources écrites à l'analyse de la matière. Bilan de 20 ans de recherches et perspectives. Ædificare. Revue internationale d'histoire de la construction : 79-121.

L'Héritier, M., Arles, A., Disser, A., Gratuze, B., 2016a. Lead it be ! Identifying the construction phases of gothic cathedrals using lead analysis by LA-ICP-MS. Journal of Archaeological Reports 6 : 252-265.

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984

L'Héritier, M., Azéma, A., Syvilay, D., Delqué-Kolic, E., Beck, L., Guillot, I., Bernard, M., Dillmann, Ph., 2023. Notre-Dame de Paris : The first iron lady ? Archaeometallurgical study and dating of the Parisian cathedral iron reinforcements. PLOS ONE 18, e0280945. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280945

L'Héritier, M., Baron, S., Cassayre, L., Téreygeol, Fl., 2015. Bismuth behaviour during ancient processes of silver–lead production. Journal of Archaeological Science 57 : 56-68.

L'Héritier, M., Dillmann, Ph., Sarah, G., 2020. Deciphering the Iron Provenance on a Medieval Building Yard : The Case of Bourges Cathedral. Minerals 10, 1131. https://doi.org/10.3390/min10121131

L'Héritier, M., Guillot, I., Dillmann, Ph., 2019. Microstructural Characterization and Mechanical Properties of Iron Reinforcements in Buildings from the Medieval and Modern Periods in France. International Journal of Architectural Heritage 13 : 507-519. https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1563229

L'Héritier, M., Leroy, St., Dillmann, Ph., Gratuze, B., 2016b. Characterisation of slag inclusion in iron objects. *In* Dussubieux, L., Golitko, M., Gratuze, B. (dir.), Recent Advances in Laser Ablation ICP-MS for Archaeology. Springer, Berlin, 213-228.

Pernicka, E., Bachmann, H.-G., 1983. Archaeometallurgical Investigations on Ancient Silver Smelting at Laurion. III. The Behaviour of Certain Trace Elements When Cupellating Lead. Erzmetall 36 : 592-597.

Petrik, J., Burdzová, L., Legemza, J., Blaško, P., 2022. The development of the blast furnace metallurgy of the iron in Slovakia. Acta Montanistica Slovaca 27.

Rehren, Th., Prange, M., 1998. Lead metal and patina : a comparison. Metallurgica antiqua : 183-196.

Spufford, P., 1988. Money and its use in Medieval Europe. Cambridge University Press, Cambridge.

Suchý, M., 2016. St Vitus Building Accounts (1372–1378) : The Economic Aspects of Building the Cathedral. *In* Zaoral, R. (dir.), Money and Finance in Central Europe during the Later Middle Ages. Palgrave Macmillan UK, Londres, 222-246. https://doi.org/10.1057/9781137460233_15

Syvilay, D., Azéma, A., Sarah, G., Costa, R., L'Héritier, M., 2024. Casting, joining and recycling. Use of lead and plumbers practices in Notre-Dame building yard (12th-19th c.) through historical, archaeological and chemical investigations. Journal of Cultural Heritage 65 : 87-98. https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.02.005

Syvilay, D., Texier, A., Arles, A., Gratuze, B., Wilkie-Chancellier, N., Martinez, L., Serfaty, S., Detalle, V., 2015. Trace element quantification of lead based roof sheets of historical monuments by laser induced breakdown spectroscopy. Spectrochimica Acta Part B : Atomic Spectroscopy 103 : 34-42.

Taupin, J.-L., 1996. Le fer des cathédrales. Monumental : 18-27.

Published in : BERRANGER, Marion ; SARAH, Guillaume ; TÉREYGEOL, Florian (dir.), *Paléométallurgie, archéométrie et archéologie. Recueil en hommage à Philippe Fluzin*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005984, doi : 10.17184/eac.9782813005984