La transition des procédés de fabrication du fer à l'orée du XIV^{e} siècle en Wallonie

Lecture archéométrique à travers quatre édifices de la région de Bruxelles-Capitale

Enrique VEGA(1), Philippe DILLMANN(1), Maxime L'HÉRITIER(2), Emmanuelle DELQUÉ-KOLIČ(3), Christophe MAGGI(4)

(1) IRAMAT-LAPA UMR7065 CNRS et NIMBE UMR3685 CEA/CNRS
(2) Université Paris 8 - ArScAn UMR7041
(3) Laboratoire de Mesure du Carbone 14 – CEA-CNRS
(4) Royal Institute for Cultural Heritage (BE)

DOI : https ://doi.org/10.17184/eac.9870

Résumé : Plusieurs campagnes de prélèvements sur les renforts métalliques de quatre bâtiments bruxellois datant du XIV^{e} au XV^{e} siècle permettent d'investiguer les modalités de production du fer à une période charnière qui voit s'opérer la transition entre les procédés de fabrication direct et indirect. Des méthodes analytiques, intégrant étude métallographique, composition chimique des inclusions non métalliques et datation radiocarbone des fers, ont été mises en œuvre pour identifier les filières techniques et les inscrire dans des séquences chronologiques. Les résultats montrent que plusieurs procédés coexistaient dans la fourniture en fer d'un même édifice. La concomitance des deux filières de production est désormais attestée dans le bâti dès XIV^{e} siècle à Bruxelles, en synchronie avec d'autres régions proches comme le nord et le nord-est de la France.

Abstract: Several sampling campaigns of metal reinforcements in four Brussels buildings dating from the 14th to 15th century enabled us to investigate the ways in which iron was produced during a key period that saw the transition between direct and indirect manufacturing processes. Analytical methods, incorporating metallographic analysis, chemical composition of non-metallic slag inclusions and radiocarbon dating of the irons, were used to identify the technical processes and place them in chronological sequences. The results show that several processes coexisted in the metal supply of the same building. The concomitance of the two production processes is now attested in the building as early as the 14th century in Brussels, in synchrony with other close regions such as the north and northeast of France.

1 Introduction

Les renforts métalliques présents dans la maçonnerie des grands édifices gothiques ont suscité ces dernières années beaucoup d'intérêt chez les archéomètres. Auscultés à la fois dans les bâtiments aussi bien religieux tels que les cathédrales et les églises (Beauvais, Soissons, Auxerre, Rouen, Troyes, Liège…), que non religieux (château de Vincennes, Hôtel de Ville de Bruxelles...), ils ont montré le potentiel heuristique de leur examen pour appréhender la construction monumentale à la fin du Moyen Âge, et en même temps inscrire ces matériaux dans l'histoire des techniques (Maggi *et al.* 2012 ; Dillmann *et al.* 2020 ; L'Héritier *et al.* 2023). Les éléments ferreux ont, en fonction des minerais dont ils sont issus et des techniques de mise en forme appliquées, des compositions et des structures très variables. De ce point de vue ils sont à même de constituer un point d'entrée pour suivre l'évolution des techniques de production des métaux. Or, durant la période de construction des monuments gothiques, une nouvelle manière de produire le fer émerge dans le nord de l'Europe notamment en Suède, mais aussi en Allemagne où plusieurs hauts fourneaux datés des XIII^{e}-XIV^{e} siècles ont été étudiés (L'Héritier *et al.* 2018). Ce procédé, dit indirect, consiste en l'obtention d'une fonte qui doit ensuite être affinée pour que soit produit du fer ou de l'acier. Ce procédé est résolument différent du procédé direct pour lequel la température de fusion du métal n'est pas atteinte. L'actuel territoire belge est un jalon majeur dans la diffusion de ce procédé étant donné que sa présence est attestée dès le milieu du XIV^{e} siècle dans la région de Liège, raison pour laquelle il sera appelé « procédé wallon ». L'usage de cette technique semble s'étendre ensuite à la France puis à l'Italie et à l'Angleterre où elle remplace le procédé direct (Awty 1994, 2006, 2007). Les modalités de ce remplacement sont complexes, le procédé direct pouvant perdurer dans les territoires où le procédé indirect s'était diffusé, et ce même assez tardivement après son introduction (Dillmann *et al.* 2017). La présente étude concerne l'analyse archéométrique de pièces métalliques (agrafes, ferrures décoratives, tirants…) provenant de quatre bâtiments publics bruxellois édifiés à partir du XIV^{e} siècle. Ces fers sont donc, en raison de leur appartenance à une période charnière, des témoins de premier choix vis-à-vis des usages architecturaux et de l'évolution des techniques de fabrication du métal.

La constitution du corpus de notre étude a bénéficié de différents contextes institutionnels : d'une part, l'étude sur les charpentes bruxelloises église Notre-Dame de la Chapelle, collégiale Saints-Pierre-et-Guidon, église Notre-Dame du Sablon menée depuis plusieurs années par la Direction du Patrimoine culturel de la région bruxelloise (urban.brussels), en collaboration avec l'Université de Liège (ULiège) et l'Institut Royal du Patrimoine Artistique (IRPA) ; d'autre part, la campagne de restauration du portail du beffroi de l'Hôtel de Ville de Bruxelles supervisée par la Cellule patrimoine. Cette dernière a mis aussi à la disposition de notre étude un ensemble d'armatures mises au jour lors des restaurations du beffroi (ainsi que de la flèche) ayant eu lieu de 1992 à 1997.

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

2 Corpus et éléments de contexte historique et architectural

Les précédentes investigations archéologiques dont a fait l'objet l'église Notre-Dame du Sablon ont mis en évidence la présence de nombreux éléments métalliques dans la charpente de la nef et du transept (au niveau du chœur également, mais dans une moindre mesure et uniquement sous la forme de clous) (Cremer *et al.* 2016). Dans la nef en particulier, les cinq travées côté est, datées de la fin XV^e^ siècle, se distinguent nettement des deux travées côté ouest qui remontent au deuxième quart du XVI^e^ siècle. Les renforts métalliques sont nombreux à cet endroit du bâtiment (tirants, ancres…). 14 échantillons ont été prélevés au niveau des tirants choisis parmi ceux probablement présents dès l'édification de la charpente (et donc datés entre le XV^e^ et le XVI^e^ siècle) (Maggi 2015a).

Dans l'église Notre-Dame de la Chapelle, les seuls éléments métalliques encore visibles se situent au niveau de la tour ouest et du comble de la nef dans la maçonnerie des murs gouttereaux (Maggi 2015b). Pour ces derniers il s'agit de tirants dont les extrémités en anneau étaient destinées à être associées à d'autres pièces métalliques aujourd'hui absentes. L'analyse typo-morphologique de ces tirants montre une grande analogie avec les armatures du même type recensées dans l'église Notre-Dame du Sablon, ce qui suggère que les tirants ont été posés au cours de la deuxième moitié du XV^e^ siècle au moment de l'édification de la charpente (celle-ci ayant été détruite lors de l'incendie de 1695, puis reconstruite mais apparemment sans renforts métalliques) (Eeckhout *et al.* 2004 ; Schnell *et al.* 2005 ; Maggi 2015b). Deux échantillons ont été prélevés en procédant à des découpes radiales sur les anneaux présents en bout de barre. Un troisième échantillon a été prélevé sur un tirant par une découpe angulaire.

Les éléments métalliques présents dans la charpente de la collégiale Saints-Pierre-et-Guidon sont beaucoup plus nombreux et visibles à la fois dans la nef, le chœur et le transept du bâtiment (Maggi 2019). La charpente contient des bandes de fer, des clous et des tirants qui sont très certainement pour la plupart des armatures présentes dès la construction de ces charpentes dendro-datées de la deuxième moitié du XV^e^ et de la première moitié du XVI^e^ siècle (Weitz *et al.* 2016). Des variantes typo-morphologiques ont été répertoriées, en particulier en ce qui concerne les tirants parmi lesquels on peut distinguer quatre types déterminés principalement par la forme de leurs extrémités (Maggi 2019). 23 échantillons ont été prélevés sur les extrémités distales des tirants les plus anciens.

L'édification à Bruxelles de l'Hôtel de Ville de style gothique débuta un peu plus tôt, à l'aube du XV^e^ siècle. Une aile droite fut ajoutée dans un deuxième temps en 1444-1449, ce qui fait du grand portail côté Grand-Place un élément essentiel de cette transformation architecturale. La dernière séquence importante de construction concerne ensuite l'édification de la partie supérieure et de la flèche en 1449-1455 (Sosnowska 2018). Les charpentes d'origine de cet édifice ont entièrement disparue et ont été reconstruites au lendemain des destructions liées au bombardement français de 1695 (Weitz *et al.* 2018). En revanche, les vantaux du grand portail semblent être encore ceux d'origine (Fraiture *et al.* 2018). Six échantillons ont ainsi été prélevés sur les ferrures présentes dans la boiserie du grand portail dont les éléments décoratifs (notamment le tympan et la statuaire) datent de la construction de l'aile droite. Un

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

des échantillons a été prélevé en laboratoire sur un ornement endommagé qui s'était désolidarisé d'un vantail. La tour est partie prenante de l'histoire mouvementée de l'Hôtel de Ville depuis son édification entre 1449 et 1455, et des nombreuses campagnes de restauration qu'elle a connues dès le tournant des XV^e^ et XVI^e^ siècles jusqu'au XX^e^ siècle. 89 armatures ont fait l'objet d'un classement typologique qui a permis de sélectionner 50 armatures représentatives, et possiblement anciennes (L'Héritier *et al.* 2018).

Le corpus issu de ces quatre édifices bruxellois est constitué au total de 96 prélèvements de fers anciens, liés pour chacun d'entre eux à des enjeux à la fois de chronologie et de fonctionnalité. Il est alors primordial de définir d'abord le contexte exact de l'emploi des éléments ferreux (d'où l'importance de la datation absolue, lorsqu'elle est réalisable) et d'investiguer leur origine et leur nature afin de les rendre opérants vis-à-vis de la réflexion sur les procédés techniques. L'analyse métallographique reste le préalable incontournable de l'approche archéométrique pour toute étude visant à la compréhension de la chaîne opératoire en paléométallurgie (Fluzin 2000, 2004).

3 Méthodes analytiques

Les principales étapes de la préparation des échantillons incluent : l'enrobage dans une résine époxy des échantillons puis la préparation par polissage avec des disques abrasifs diamantés jusqu'à une finition métallographique de 1 micron. L'attaque chimique au réactif Nital a permis d'examiner la structure métallographique à l'aide d'un microscope optique pour identifier le type d'acier, les soudures, le niveau d'impureté. Les phases cristallines de carbone ont été observées et analysées par imagerie pour déterminer les taux de carbone et d'inclusions. La composition chimique des inclusions non métalliques (qui recèlent les indices de fabrication) a été mesurée, après repolissage, par spectrométrie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS) couplée à un microscope électronique à balayage, via un système de cartographie intégrale des coupes transversales qui permet l'analyse automatisée de plusieurs centaines d'inclusions par objet. Pour chaque cartographie, les inclusions ont été classées et celles liées à l'étape de réduction ont été identifiées (Dillmann *et al.* 2007) (Disser *et al.* 2014). Enfin, la datation radiocarbone des pièces métalliques a été réalisée en collaboration avec le laboratoire de Mesure du Carbone 14 (LMC14) au CEA Saclay. Un protocole spécifique d'extraction du carbone des aciers archéologiques a été suivi, nécessitant la sélection des zones les plus aciérées en métallographie pour prélever localement le métal carburé à l'aide d'un foret de petit diamètre (Leroy *et al.* 2015).

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'analyse de la composition chimique des inclusions en éléments majeurs permet de déterminer le procédé de réduction utilisé pour transformer le minerai en métal (procédé direct ou indirect). Le principe de l'analyse, abordé par ailleurs dans un autre chapitre de cet ouvrage, est de comparer la teneur moyenne pondérée de la surface des inclusions de chaque objet à celle d'un corpus de référence constitué par notre équipe et représentatif de l'un ou l'autre des procédés. Ainsi, pour chacun des objets analysés, une teneur moyenne pondérée de la surface est calculée pour tenir compte de toutes les inclusions analysées (Dillmann *et al.* 2007).

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

La comparaison avec le corpus de référence peut se faire avec différentes méthodes. L'une d'elles consiste à intégrer les échantillons dans un abaque de référence direct/indirect. Le test peut conduire à une indétermination lorsqu'un échantillon se positionne dans une zone de l'abaque où le recouvrement des corpus direct et indirect ne permet pas d'attribuer avec certitude son appartenance à une des deux familles du corpus de référence. C'est pourquoi nous avons aussi utilisé la régression logistique qui, à travers le calcul de probabilités d'appartenance, peut se révéler dans certains cas plus discriminante (Disser *et al.* 2014).

4 Ce que les nouvelles données nous apportent

L'analyse archéométrique conjointement menée d'alliages ferreux issus de l'Hôtel de Ville de Bruxelles, de la collégiale Saints-Pierre-et-Guidon, de l'église Notre-Dame de la Chapelle et de l'église Notre-Dame du Sablon à Bruxelles, montre que les renforts métalliques (et les quelques éléments décoratifs prélevés sur le portail de l'Hôtel de Ville) sont des objets relativement peu manufacturés, caractéristique qui se manifeste notamment par des niveaux élevés d'hétérogénéités (notamment en terme de répartition du carbone et des inclusions). Cela en fait un matériau proche d'un demi-produit sommairement mis en forme, dont la microstructure relève du fer peu allié. Ces aspects métallographiques sont concordants avec ce que l'on trouve par ailleurs à la même période dans les armatures en fer des édifices religieux (L'Héritier *et al.* 2019).

Les datations par radiocarbone des éléments en fer prélevés dans la charpente de la collégiale Saints-Pierre-et-Guidon indiquent que la partie correspondant au chœur est postérieure à celle des transepts. En effet, les fers prélevés dans les transepts nord et sud ont permis d'estimer la date d'édification de la charpente à cet endroit du bâtiment au XIV^{e} siècle, alors que la date obtenue à partir de l'armature en fer prélevée dans la charpente du chœur se situe un peu avant le XV^{e} siècle (Figure 1). Ce résultat doit être mis en regard de la datation par dendrochronologie de la charpente du chœur qui indique plutôt le dernier quart du XV^{e} siècle (Maggi 2015c). Sans exclure totalement la possibilité qu'un fer plus ancien ait pu être réemployé dès les premiers stades de la construction au début du XIV^{e} siècle, on peut considérer que les renforts de la charpente du transept (et par extension de la nef) constituent une source d'informations sur la nature de la fourniture métallique durant la période 1350-1400. Or l'analyse des procédés de fabrication a montré que tous les fers présents dans la charpente du transept sud sont issus de la filière directe, alors que les fers présents dans la charpente de la nef et du transept nord sont tous issus de la filière indirecte (abstraction faite de deux cas indéterminés) (Figure 1). Ce résultat montre la diversité des sources d'approvisionnement des fournitures métalliques à l'échelle de l'édifice et que cette diversité s'exprime dans ce cas suivant les parties du bâtiment (nef, transept sud, transept nord, chœur). L'occurrence d'une utilisation synchrone de fers issus de procédés direct et indirect vient renseigner un jalon jusque-là vierge dans la période 1350-1400 sur le territoire belge.

Comme évoqué précédemment, la charpente du chœur de la collégiale Saints-Pierre-et-Guidon correspond à une période plus tardive puisqu'elle a été datée par dendrochronologie entre les années 1478 et 1488. Or dans le chœur, tous les éléments métalliques

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

ont été déterminés comme étant issus du procédé indirect (Figure 1). On peut comparer ce résultat avec celui obtenu à partir des trois prélèvements effectués sur les tirants du comble de l'église Notre-Dame de la Chapelle. En effet, les tests montrent qu'ils proviennent tous de la filière indirecte (Figure 1). Or ces tirants sont considérés comme contemporains de la construction de la charpente de la nef qui a été érigée au cours du XV^e^ siècle (Maggi 2015b). Donc à cette période le chantier de Notre-Dame de la Chapelle a été alimenté, comme pour la collégiale Saints-Pierre-et-Guidon, par des fers provenant exclusivement de la filière indirecte. Bien que, là encore, le nombre d'échantillons (trois) soit faible, il s'agit du deuxième cas (en comptant les fers du chœur de la collégiale Saints-Pierre-et-Guidon) d'un lot intégralement issu de la filière indirecte et datant de la période 1450-1500. Les résultats obtenus à partir des fers de l'église Notre-Dame du Sablon amènent cependant à nuancer ce qui ressemblerait à l'hégémonie du procédé indirect. En effet, l'analyse des armatures en fer de cette église, dont la construction serait pour une partie contemporaine de celle de l'église Notre-Dame de la Chapelle, et pour l'autre, de peu postérieure (deuxième quart du XVI^e^ siècle), atteste que le métal est issu à la fois des procédés direct et indirect. Ce qui va dans le sens, en l'absence de toute évidence de remploi, d'une coexistence des deux filières à cette période, c'est-à-dire 1450-1530, à l'échelle d'un même édifice.

Par ailleurs, le résultat de la datation radiocarbone d'un fer décoratif prélevé sur le portail de l'Hôtel de Ville de Bruxelles indique que les ferrures remontent à l'origine du bâtiment, soit au début du XV^e^ siècle (Figure 1). Les armatures du beffroi, et les ferrures de son portail, ont donc été produites au cours de la même séquence chronologique. L'analyse archéométrique des échantillons des fers les plus anciens du beffroi montre une prédominance de la filière directe car beaucoup d'exemplaires identifiés comme étant issus de la filière directe correspondent à des réparations ou à des consolidations postérieures (Figure 1). Cependant, l'étude des ferrures du portail indique que les fers sont aussi bien issus du procédé direct que du procédé indirect ce qui va dans le sens de la coexistence des deux filières à l'échelle de l'édifice.

Une lecture chronologique plus fine permettrait d'identifier une organisation par lots de même origine. C'est ce qui semble être observable pour les éléments métalliques issus de la charpente de la collégiale de Saints-Pierre-et-Guidon, où à l'échelle du chœur, de la nef et des deux transepts tous les fers sont issus du même procédé (Figure 1).

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

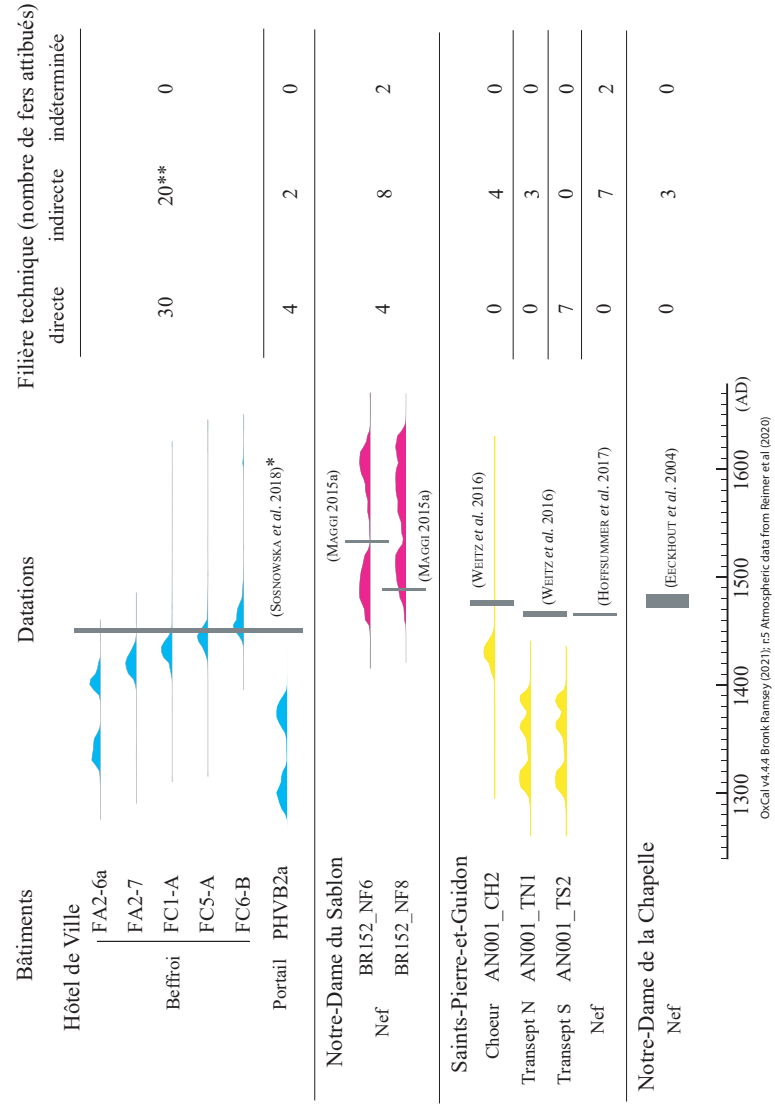


Fig. 1 : Datations radiocarbone d'aciers prélevés sur les quatre bâtiments. Les dates obtenues (calibrées AD) sont présentées sous la forme de distributions de probabilités. En complément sont reportées les dates des charpentes obtenues par dendrochronologie (sauf * indiquant une source textuelle) accompagnées de leur référence bibliographique. En regard des datations figure le tableau des attributions du procédé de réduction (direct, indirect ou indéterminé) où ** indique une majorité de réparations ou de consolidations postérieures à la date de construction.

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

5 Conclusion

L'analyse des inclusions non métalliques des fers a permis de déterminer, dans la plupart des cas, la filière technique à l'origine de leur élaboration. À part les renforts issus de l'église Notre-Dame de la Chapelle qui proviennent exclusivement de la filière indirecte, tous les renforts des autres édifices (dont ceux de la collégiale Saints-Pierre-et-Guidon) se partagent entre les deux filières de production. Ainsi, un même édifice abrite à la fois des fers issus de la filière directe et des fers issus de la filière indirecte. En région wallonne, et notamment Liège, l'identification du procédé indirect dans les éléments de renfort remonte à la période 1300-1350. Mais jusqu'à présent l'emploi de fers issus de la filière indirecte n'avait pu être établie pour cette même période dans la région de Bruxelles (Dillmann *et al.* 2017). Les récentes datations des fers du beffroi de l'Hôtel de Ville avaient mis en évidence la présence des deux procédés de fabrication au XV^{e} siècle (L'Héritier *et al.* 2018), avec cependant une hégémonie du procédé direct. La présente étude permet donc de mieux appréhender l'ampleur de l'utilisation de renforts métalliques issus indifféremment des filières directe et indirecte dès le XIV^{e} siècle dans la région bruxelloise, synchrone avec une partie du royaume de France (Nord et Grand-Est). Cette présence du procédé indirect est à rapprocher de celle mise en évidence dans la cathédrale de Troyes pour laquelle la fourniture métallique est constituée à la même période d'un tiers d'aciers issu du procédé indirect (sachant que l'implantation du nouveau procédé est avérée dès la fin du XIV^{e} siècle dans le pays d'Othe) (Dillmann *et al.* 2017). Elle est aussi à rapprocher des églises de Rouen et des cathédrales Saint-Etienne de Metz et Notre-Dame d'Amiens pour lesquelles les mêmes proportions de fers issus des filières directe et indirecte ont été relevées, bien que pour des périodes plus tardives. Grâce à la datation par radiocarbone d'une partie des renforts métalliques, de nouveaux indices chronologiques invitent à repenser la dynamique de diffusion du procédé indirect dans le territoire wallon suite aux nouvelles occurrences attestées pour les périodes 1350-1400 et 1450-1500, jusqu'ici peu documentées en ce qui concerne ce procédé.

Remerciements : Sophie Rassat et Vincent Heymans de la Cellule Patrimoine historique de la Ville de Bruxelles ; Patrick Hoffsummer, professeur émérite d'archéologie médiévale à l'Université de Liège.

Bibliographie

Awty, B.G., 1994. *Were there mediaeval ironworking contacts between Sweden and Namur ? The Journal of the Historical Metallurgy Society*, **28** (1) : 7-10.

Awty, B.G., 2006. *The elusive Walloon finery forges of Liège. Historical Metallurgy*, 2006. **40,** (2) : 129-137.

Awty, B.G., 2007. *The development and dissemination of the walloon method of ironworking. Technology and culture*. **48,** (4) : 783-803.

Cremer S., Fraiture P., Hoffsummer P., Modire S., Maggi Chr., Sosnowska P., Weitz A., 2016. Bois, brique et fer : approche multi-disciplinaire de la charpente de l'église Notre-Dame du Sablon, Bruxelles, *Chronique Archaeologia Mediaevalis*, 39 : 151-153.

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, (11) : 1810-1823.

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

Dillmann, Ph., L'Héritier, M., 2017. Archéométrie et histoire des techniques : les procédés direct et indirect en sidérurgie (XIV^{e}-XVII^{e} siècles). *In* L. Hilaire-Perez (éd.). *L'Europe technicienne (XV^{e}-XVIII^{e} siècles).* Presses Universitaires de Rennes, Rennes, 67-88.

Dillmann, Ph., L'Héritier, M., Disser, A., Leroy, St., Vega, E., 2020. Produire, échanger, utiliser les métaux ferreux au Moyen-Âge : nouveaux éclairages interdisciplinaires. *In* Y. Henigfeld, Ph. Husi, F. Ravoire (éd.), *L'objet au Moyen Âge et à l'époque moderne : fabriquer, échanger, consommer et recycler, Actes du XI^{e} congrès de la SAMMC, Bayeux, 28-30 mai 2015*, Publications du CRAHM, Caen, 197-210.

Disser A., Dillmann, P., Bourgain, C., L'Héritier, M., Vega, E., Bauvais, S., 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.

Eeckhout, J., Houbrechts, D., Nuytten, D., 2004. *Analyse typologique et dendrochronologique de la charpente*, dans *L'église Notre-Dame du Sablon. Histoire et Restaurations. Région de Bruxelles-Capitale* (éd.), Bruxelles : 100-107.

Fluzin, Ph., Ploquin, A., Serneels, V., 2000. Archéométrie des déchets de production sidérurgique : Moyens et méthodes d'identification des différents éléments de la chaîne opératoire directe. *Gallia*, vol. 57, CNRS Éditions, Paris, 101-121.

Fluzin, Ph., 2000. La Chaîne opératoire en sidérurgie : matériaux archéologiques et procédés, apport des études métallographiques. *In* P. Pétrequin, Ph. Fluzin, P. Thiriot, P. Benoit (dir.). *Arts du feu et productions artisanales. XX^{e} Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*, Éditions APDCA, Antibes.

Fraiture P., Gautier P., Weitz A., Boudin M., 2018. Étude archéologique et datation des vantaux en bois du portail de l'Hôtel de Ville de Bruxelles donnant sur la Grand-place, *Studia Bruxellae. L'Hôtel de Ville de Bruxelles – Bilan de trois années d'études du bâti*, 1, (12) : 126-148.

Hoffsummer, P., Weitz, A., Charruadas, P., Cremer, S., Fraiture, P., Modrie, S., Maggi, C., Sosnowska, P. Du nouveau à propos de la typo-chronologie des charpentes médiévales en région Bruxelles-Capitale (RBC). *Archaeologia Mediaevalis, 2017*, 88-90.

L'Héritier, M., Vega, E., Dillmann, Ph., Delqué-Količ, E., 2018. Les armatures métalliques de la tour de l'Hôtel de Ville de Bruxelles. Approches typologique et archéométrique, *Studia Bruxellae. L'Hôtel de Ville de Bruxelles – Bilan de trois années d'études du bâti,* 1, (12) : 179-206.

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, (3) : 507-519.

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 (3).

Leroy, St., Hendrickson, M., Delqué-Kolic, E., Vega, E., Dillmann, Ph., 2015. First Direct Dating for the Construction and Modification of the Baphuon Temple Mountain in Angkor, Cambodia, *PLoS ONE*, 10 (11).

Maggi, Chr., Pagès, G., Mertens, A., Hoffsummer, P., 2012. Utilisation et technique de production du fer et du bois dans les charpentes de comble mosanes : premiers jalons d'une évolution du XII^{e} au XVIII^{e} siècle. *Archéosciences, Revue d'Archéométrie*, 36 : 95-115.

Maggi, Chr., 2015a. *Rapport d'étude archéologique des armatures métalliques de charpente. Eglise Notre-Dame du Sablon à Bruxelles*, *Institut Royal du Patrimoine Artistique*, Réf IRPA 2015.12717 (Rapport inédit).

Maggi, Chr., 2015b. *Rapport d'étude archéologique des armatures métalliques de charpente. Eglise Notre-Dame de la Chapelle à Bruxelles*, *Institut Royal du Patrimoine Artistique*, Réf IRPA 2015.12778 (Rapport inédit).

Maggi, Chr., 2019. *Rapport d'étude archéologique des armatures métalliques de charpente. Collégiale Saints-Pierre-et-Guidon à Bruxelles*, *Institut Royal du Patrimoine Artistique*, Réf IRPA 2015 (Rapport inédit).

Maggi, *Chr., 2020. Iron reinforcements in the medieval and modern attics of Belgium. In W. P. Campbell (dir.). Iron, Steel and Buildings, Proceedings of the Seventh Conference of the Construction History Society, Cambridge, 3-14.*

Peters, M., 2005. Notre-Dame de la Chapelle. Bruxelles, *Schnell et Steiner* (éd.), Luxembourg.

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

Sosnowska, Ph., Byl, S., Doperé, Fr., Huyvaert, Fr., 2018. L'Hôtel de Ville de Bruxelles. Apport de l'archéologie à la compréhension d'un édifice majeur au travers d'une étude des maçonneries gothique. *Studia Bruxellae. L'Hôtel de Ville de Bruxelles – Bilan de trois années d'études du bâti*, 1, (12) : 43-75.

Weitz, A., Cremer S., Maggi C., Fraiture P. et Hoffsummer P., 2016. Rapport d'analyse dendrochronologique. Complément d'étude : la collégiale Saint-Pierre-et-Guidon, Anderlecht, Institut Royal du Patrimoine Artistique, Réf IRPA 2015.12837 (Rapport inédit).

Weitz, A., Cremer S., Maggi C., Fraiture P. et Hoffsummer P., 2018. Les charpentes de l'Hôtel de Ville de Bruxelles : témoin caché du XVIIIe siècle. *In* V. Heymans (dir.), L'hôtel de Ville de Bruxelles – Bilan de trois années d'études du bâti, Bruxelles, Archives de la Ville de Bruxelles, Studia Bruxellae 12, 76-79.

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