

Utilisation et technique de production du fer et du bois dans les charpentes de comble mosanes : premiers jalons d'une évolution du XIIe au XVIIIe siècle

Christophe Maggi, Gaspard Pagès, Anne Mertens, Philippe Hoffsummer

▶ **To cite this version:**

Christophe Maggi, Gaspard Pagès, Anne Mertens, Philippe Hoffsummer. Utilisation et technique de production du fer et du bois dans les charpentes de comble mosanes : premiers jalons d'une évolution du XIIe au XVIIIe siècle. Archeosciences, revue d'Archéométrie, 2012, 36, pp.95-115. halshs-00870709

HAL Id: halshs-00870709
https://shs.hal.science/halshs-00870709

Submitted on 15 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

© Presses universitaires de Rennes

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

Use and Production Technique of Iron and Wood in Mosan Attic Frames: First Steps of an Evolution since the 12th until the 18th Century

Christophe Maggi*, Gaspard Pagès*, **, Anne Mertens*, ***
et Patrick Hoffsummer*

Résumé : Le développement d'une approche comparative entre l'évaluation de la quantité de grumes mises en œuvre dans une charpente de comble et le volume de bois présent dans ce même comble, permet l'acquisition d'informations relatives aux contextes économique, technique et social dans lesquels le chantier a été conduit. En réalisant ce type de comparaison de façon systématique dans vingt-trois édifices religieux mosans (Belgique et Pays-Bas), il est possible de retracer, étape par étape, grâce aux datations dendrochronologiques des charpentes du XII^e au XVIII^e siècle, les causes et les moteurs ayant influencé les modes de construction des charpentiers. En parallèle, la confrontation de ces enseignements avec les volumes de fer utilisés dans les combles rend compte de la prise d'importance de ce matériau au fil du temps et de l'évolution des principes architecturaux. Ce volet de l'étude a été enrichi d'analyses archéométallurgiques destinées à déterminer le mode de réduction employé pour produire ces éléments métalliques afin de mesurer l'éventuelle influence d'innovations sidérurgiques sur l'emploi du fer dans les charpentes médiévales et modernes, sachant que la Wallonie a connu, à partir de la fin du Moyen Âge, le développement précoce de la métallurgie du fer indirecte (métallurgie moderne) en lieu et place de la métallurgie du fer directe (métallurgie ancienne).

Abstract: *The development of a comparative approach between the evaluation of the quantity of timber used in a roof frame and the volume of wood present in this same attic allows the acquisition of information about the economical, technical and social contexts in which a timber frame was drawn up. By carrying out this kind of comparison in a systematic way in twenty-tree religious mosan buildings (Belgium and Netherlands), it's possible to trace, step by step, thanks to dendrochronologic dating of the attics since 12th until 18th century, the causes and consequences which influence the methods of constructions of the carpenters. In parallel, the confrontation of this result with the volumes of iron used in the attics reveals the growing importance of this material in function of the time and of the architectural principles. This part of the study was enriched by archeometallurgic analyses intended to identify the process of reduction employed to produce this metal with the aim to measure the possible influence of iron process innovations on the use of iron in the medieval and modern frames, knowing that Wallonia knew from the end of the Middle Ages the early development of the indirect iron process instead of the direct iron process.*

Mots clé : Charpente, procédés direct et indirect de production du fer, Belgique, Moyen Âge, Dendrochronologie, Archéométallurgie.

Keywords: *Timber frame, direct and indirect iron process, Belgium, Middle Age, Dendrochronology, Archaeometallurgy.*

** Centre Européen d'Archéométrie, Université de Liège, Allée du Six Août 17, Sart-Tilman, 4000 Liège, Belgique. (cmaggi@ulg.ac.be ; gaspard.pages@gmail.com ; phoffsummer@ulg.ac.be)*
*** Laboratoire Archéomatériaux et Prévision de l'Altération, SIS2M UMR 3299 CEA/CNRS et LMC IRAMAT UMR 5060 CNRS*
**** Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering, Université Catholique de Louvain, Place Sainte-Barbe 2, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique. (amertens@hotmail.com)*

rec. sep. 2011 ; acc. may 2012

© Presses universitaires de Rennes

1. Introduction

L'emploi du fer dans l'architecture médiévale a longtemps été décrié, sous-estimé et jugé comme l'indication d'un manque de compétence et d'une ignorance des règles architecturales. Cependant, depuis les années 1980 et les études novatrices sur le fer forgé appliqué aux édifices médiévaux, la perception de l'emploi du métal dans l'architecture a largement évolué (Wilcox, 1981 ; Stroobants, 1985 ; Benoît, 1985 ; Belhoste, 1996 ; Férauge, 1996). Les recherches se sont multipliées et la problématique abordée sous les angles historique, archéologique et archéométrique est devenue un foyer de l'interdisciplinarité (Erlande-Brandenburg, 1996 ; Taupin, 1996 ; Bernardi et Dillmann, 2002 ; Texier *et al.*, 2007 ; L'Héritier, 2009 ; Timbert, 2009). Ainsi, aujourd'hui, il est admis que le fer tient une place importante dans la grande famille des matériaux mis en œuvre dans la construction des édifices gothiques et modernes. Néanmoins, les recherches se concentrent essentiellement sur le fer forgé utilisé dans la maçonnerie. En ce qui concerne l'emploi du métal dans les charpentes, ces travaux ont rarement dépassé l'étape de l'observation (Fischer-Kohnert, 1999 ; Hoffsummer, 1999 ; Tampone, 2002 ; Eissing, 2009 ; L'Héritier *et al.*, 2010 ; Aumard *et al.*, 2011).

C'est pour contrecarrer cet état des lieux qu'en région wallonne, essentiellement dans la province de Liège (Belgique), des études ont été conduites sur l'emploi du fer dans les charpentes de comble. Les enquêtes bénéficiaient ici de la conservation exceptionnelle d'un nombre important de charpentes anciennes et des études dendrochronologiques et technologiques détaillées dont elles avaient fait l'objet depuis les années 1980 (Hoffsummer, 1989 ; Hoffsummer, 1995 ; Hoffsummer, 2002). Le présent article vise à discuter les premiers résultats obtenus à la suite d'investigations menées dans vingt-trois combles d'églises du sud de la Belgique et des Pays-Bas depuis 2007 (Mertens, 2009). Les questions de l'approvisionnement en bois et des volumes de bois et de fer présents au sein des combles sont successivement abordées puis confrontées aux résultats des analyses archéométallurgiques réalisées sur quarante-deux échantillons prélevés dans des éléments en fer de trois des charpentes liégeoises étudiées. L'objectif était notamment d'évaluer l'impact des innovations sidérurgiques sur l'utilisation de ces fers, sachant que la Wallonie a connu à la fin du Moyen Age le développement précoce de la métallurgie du fer indirecte[1] (métallurgie moderne), puis à l'Epoque moderne, le développement industriel de cette technique en lieu et place de la métallurgie du fer directe[2] (métallurgie ancienne) (Évrard, 1956 ; Pirotte, 1966 ; Gillard, 1971 ; Hansotte, 1968 ; Hansotte, 1972 ; Pasquasy, 2005 ; Awty, 2007).

Les méthodes d'investigations développées pour cette recherche relèvent à la fois de l'archéologie du bâti et de l'archéométrie. Le croisement de ces deux disciplines permet d'envisager de façon parallèle l'évolution des techniques de construction et des procédés de production et de fabrication des matériaux bois et fer. Cette confrontation est replacée dans le contexte socio-économique du bassin mosan afin de distinguer les origines et les moteurs ayant influencé l'utilisation des différentes matières : modifications des styles architecturaux, variations de l'approvisionnement en matériaux de construction ou des modes de production, etc. Dans cette perspective, l'étude d'éléments en bois et en fer présents dans les charpentes de comble est optimisée par l'emploi de la dendrochronologie qui permet de dater précisément les phases de construction et de réparations auxquelles appartiennent les fers.

Plus avant, les résultats obtenus autorisent une première appréhension du rôle que jouent les renforts en fer sur la longue durée, du XII^e^ au XVIII^e^ siècle, au sein des charpentes de comble, tant dans l'architecture que dans l'esprit de ceux qui les utilisent.

2. Corpus et objet d'étude

Dans le cadre de cette recherche, l'étude des sources écrites n'a pas été retenue parce que la grande majorité des archives médiévales liégeoises ont été détruites au cours de la Seconde Guerre Mondiale. Les investigations reposent exclusivement sur les analyses de vingt-trois charpentes de comble. Certaines d'entre elles comprennent plusieurs phases de constructions. Ainsi, le corpus est composé de trente-sept phases de construction réparties entre le XII^e^ et le XVIII^e^ siècle, c'est-à-dire, entre la fin de l'« époque romane » et la fin des Temps modernes, entre les productions de type artisanal et la proto-industrialisation notamment sidérurgique (tableau 1).

Le corpus est uniquement constitué d'édifices religieux de plan basilical avec des toitures à double pente. De plus, toutes les charpentes étudiées sont entièrement construites avec du bois de chêne et structurées par des fermes disposées à

1. Selon le lexique publié dans Mangin 2004, « la méthode de réduction indirecte regroupe les procédés au cours desquels le minerai de fer est réduit et passe à l'état liquide. La diffusion du carbone dans le métal est beaucoup plus importante et le produit obtenu est une fonte. Cette fonte devra ensuite être décarburée pour être transformée en fer ou en acier. Cette deuxième étape, l'affinage, justifie l'appellation indirecte ».

2. Selon le lexique publié dans Mangin 2004, « procédé de production du fer par réduction des oxydes de fer à l'état solide. À aucun moment, le métal ne subit une fusion ».

© Presses universitaires de Rennes

Edifices	chrono.	N°	Typologie de charpente	Pente toits	Charpente L. x l. x h. (m)	Nb grumes / ferme	Nb grumes tot.	Vol. tot. charpente (m3)	Vol. tot. bois charpente (m3)
Seilles, église St-Etienne	1175d	1	**Chevrons formant fermes non contreventée**, entrait à chaque ferme, sans poinçon	42°	16,3 x 7,5 x 3,8	6	120	232,28	14,63
Floreffe, abbatiale - phase 1a	1180d	2		47°	11 x 12,4 x 7	6	71,5	477,40	28,76
Floreffe, abbatiale - phase 1b	1180d			47°	9 x 13,7 x 7,1	6	60	437,72	28,15
Liège, collégiale St-Barthélemy	1188d	3		41°	25 x 10,9 x 5,1	4	120	694,88	45,21
Matagne, église St-Hilaire	1194d	4		42°	10,5 x 8,4 x 4	6	78	168,00	9,87
Reppe, église St-Martin	1214d	5		45°	8 x 6,6 x 3,1	5	40	81,84	5,67
Floreffe, abbatiale - phase 2	1235d	2	**Chevrons formant fermes contreventée.** Alternance fermes principales et secondaires	47°	33 x 13 x 7	19	228	1501,50	72,35
Huy, église St-Mort	1244d	6	**Chevrons formant fermes non contreventée**, à structure tramée	44°	9,6 x 7,3 x 4	9	63	140,16	8,35
Liège, cathédrale St-Paul - phase 1a	1252d	7	**Chevrons formant fermes et pannes.** Alternance fermes principales et secondaires	60°	28,3 x 12,1 x 10,4	27	162	1780,64	80,09
Liège, cathédrale St-Paul - phase 1b	1252d			60°	12 x 11 x 10	25	68	660,00	32,3
Liège, collégiale Ste-Croix - phase 1	1253d	8	**Chevrons formant fermes**, alternance de fermes principales et secondaires	60°	7,3 x 10,3 x 8,5	/	48	319,56	12,81
Liège, collégiale Ste-Croix - phase 2	1284d		**Chevrons formant fermes et pannes**, alternance de fermes principales et secondaires	60°	22,7 x 10,1 x 8,5	16	146	974,40	59,97
Liège, cathédrale St-Paul - phase 2	1300d	7		60°	9,5 x 12,3 x 10	23	46	540,00	22,2
Liège, collégiale St-Denis phase 1	1329d	9	**Fermes et pannes** avec contre-fiches et arbalétriers de jouée	45°	/ x 11,5 x 5,6	/	/	1030,4	20,31
Liège, cathédrale St-Paul - phase 3a	1330d	7	**Chevrons formant fermes et pannes**, alternance fermes principales et secondaires	60°	7 x 11,5 x 10,2	23	42	410,55	19,16
Liège, cathédrale St-Paul - phase 3b	1330d			60°	13,6 x 12,3 x 9,9	21	69	772,20	32,97
Liège, collégiale Ste-Croix - phase 3	1333d	8		60°	11,6 x 10,1 x 8,5	16	67	497,93	25,39
Theux, église St-Hermes-et-Alexandre - phase 1	1375d	10	**Fermes et pannes** contreventée avec pannes posées sur **portiques** à poteaux	45°	/ x 15,1 x 9	/	/	1943,37	48,58
Maastricht, église des dominicains	1397d	11	**Chevrons formant fermes et pannes,** alternance fermes principales et secondaires	/	/	/	/	/	/
Fosses-la-Ville, collégiale St-Feuillien - phase 1	1410d	12	**Chevrons formant fermes**, structure tramée, contreventée, avec arbalétriers de chambrée	59°	18,2 x 9,5 x 7,5	6	60	648,38	38,62
Fosses-la-Ville, collégiale St-Feuillien - phase 2	1415d			59°	9,5 x 9,5 x 7,5	6	30	352,69	18,89
Liège, collégiale St-Denis phase 2	1424d	9	**Chevrons formant fermes et pannes.** Alternance fermes principales et secondaires	60°	6,8 x 11,2 x 10	30	71	380,80	26,24
Maastricht, basilique Notre-Dame	1436d	13	**Fermes et pannes à portiques** superposés, avec poinçon et arbalétriers de jouée	/	/	/	/	/	/
Anthisnes, église St-Laurent	1464d	14	**Chevrons formant fermes**, à structure tramée, dépourvue de pannes, mais contreventée	52°	/ x 6,7 x 4,6	/	/	197,25	17,7
Saint-Gerard, église St-Pierre	1485d	15	**Fermes et pannes à portique** et poinçon de fermette	43°	/ x 7,3 x 3,2	/	/	139,89	7,47
Liège, basilique St-Martin phase 1	1516d	16	**Chevrons formant fermes et pannes**, fermes principales et secondaires	60°	19 x 11,9 x 11,6	40	147	1311,38	47,73
Liège, abbatiale St-Jacques	1530d	17		60°	85 x 13 x 10	27	35	5525,00	217,55
Theux, église St-Hermes-et-Alexandre - phase 2	1530d	10	**Fermes et pannes à portiques** superposés, arbalétriers de chambrée et arbalétriers de jouée	60°	9,7 x 6,8 x 5,8	13	350	191,28	8,86
Liège, basilique St-Martin phase 2	1542d	16	**Chevrons formant fermes et pannes**, fermes principales et secondaires	62°	11 x 11,1 x 11	21	90	671,55	30,66
Liège, basilique St-Martin phase 3	1551d			63°	35 x 11,3 x 11	26	296	2175,25	102,64
Scry, église St-Martin	1561d	18		53°	17,8 x 5,1 x 7,5	11	58	340,43	17,65
Floreffe, abbatiale - phase 3	1637d	2	**Fermes et pannes à portiques** superposés et poinçons de fermette, avec des arbalétriers de chambrée	50°	30 x 12,3 x 7	10	100	1291,50	51,16
Bonneville, église St-Firmin	1638d	19	**Fermes et pannes**, avec arbalétriers de chambrée, poinçon de fermette sur un **portique**	51°	8 x 5 x 5	7	21	100,00	3,41
Namur, église St-Joseph	1662d	20	**Fermes et pannes**, contreventée, avec arbalétriers de chambrée cantonnés dans un **portique**	53°	35 x 10,7 x 7,4	10	90	1385,65	57,11
Sclayn, église St-Maurice	1723d	21	**Fermes et pannes**, avec arbalétriers de chambrée cantonnés dans un **portique** et poinçon de fermette	53°	/ x 7,2 x 4,9	/	/	370,44	11,27
Amay, collégiale St-Georges-et-Ode	1765d	22	**Fermes et pannes** avec arbalétriers de chambrée	51°	18 x 9,3 x 4,5	8	48	376,65	17,26
Ramelot, église Notre-Dame	2e 1/2 XVIIIe	23		54°	6,9 x 8,4 x 5,2	6	18	150,70	6,65

Tableau 1 : Corpus et caractéristiques des charpentes des édifices étudiés (La lettre « d » accolée à la date signifie datation dendrochronologique).
Tableau 1: Corpus and features of the studied buildings roof frame (The letter « d » after the date means a dendrochronological dating) (Ch. Maggi, G. Pagès).

© Presses universitaires de Rennes

l'aplomb des zones fortes. Cela permet d'appréhender un schéma constructif unique au sein duquel les forces architectoniques en vigueur sont relativement similaires d'une charpente à l'autre. Seule la façon d'assimiler ces forces varie en fonction de la structure de la charpente. En revanche, le mode de couverture n'a pu être pris en compte, car il a été régulièrement renouvelé et demeure rarement antérieur au XIX^e^ siècle. Dans le but de dresser un véritable panorama de l'utilisation du fer et du bois dans les charpentes de comble du Moyen Âge et de l'Epoque moderne, les édifices en question sont autant des grandes cathédrales que de petites églises paroissiales.

Les bâtiments étudiés sont situés en Wallonie (Belgique), dans les provinces de Liège et de Namur, et aux Pays-Bas, dans la ville de Maastricht. Au cœur de ces localités coule la Meuse qui façonne le territoire auquel elle prête d'ailleurs son nom (fig. 1). Ce fleuve est dans la région un axe de circulation majeur qui permet d'acheminer, notamment depuis les Ardennes, les matériaux sidérurgiques et forestiers nécessaires à la construction (Suttor, 2006). Cet aspect est d'autant plus considérable que les Ardennes sont à la fois un des plus importants espaces métallurgiques en Europe au Moyen Âge et une source d'approvisionnement remarquable en bois. Ainsi, la Principauté de Liège et le Comté de Namur sont reconnus pour leurs productions sidérurgiques et pour avoir exporté du fer en France, en Hollande, dans le Saint-Empire et jusqu'en Angleterre depuis le XIII^e^ siècle (Yante, 1985 ; Suttor, 2006).

3. Méthodes

La dendrochronologie

La dendrochronologie permet de dater à l'année près les diverses phases de construction qui constituent une charpente. Cela n'est concevable que parce que le bois de charpente est mis en œuvre frais (Epaud, 2007). Si l'étude se fonde en partie sur des datations publiées (J. de Vries, 2003 ; Hoffsummer, 1995 ; Hoffsummer, 2002), les anciennes comme les récentes carottes prélevées ont été soumises au même mode opératoire. La surface des échantillons est pré-

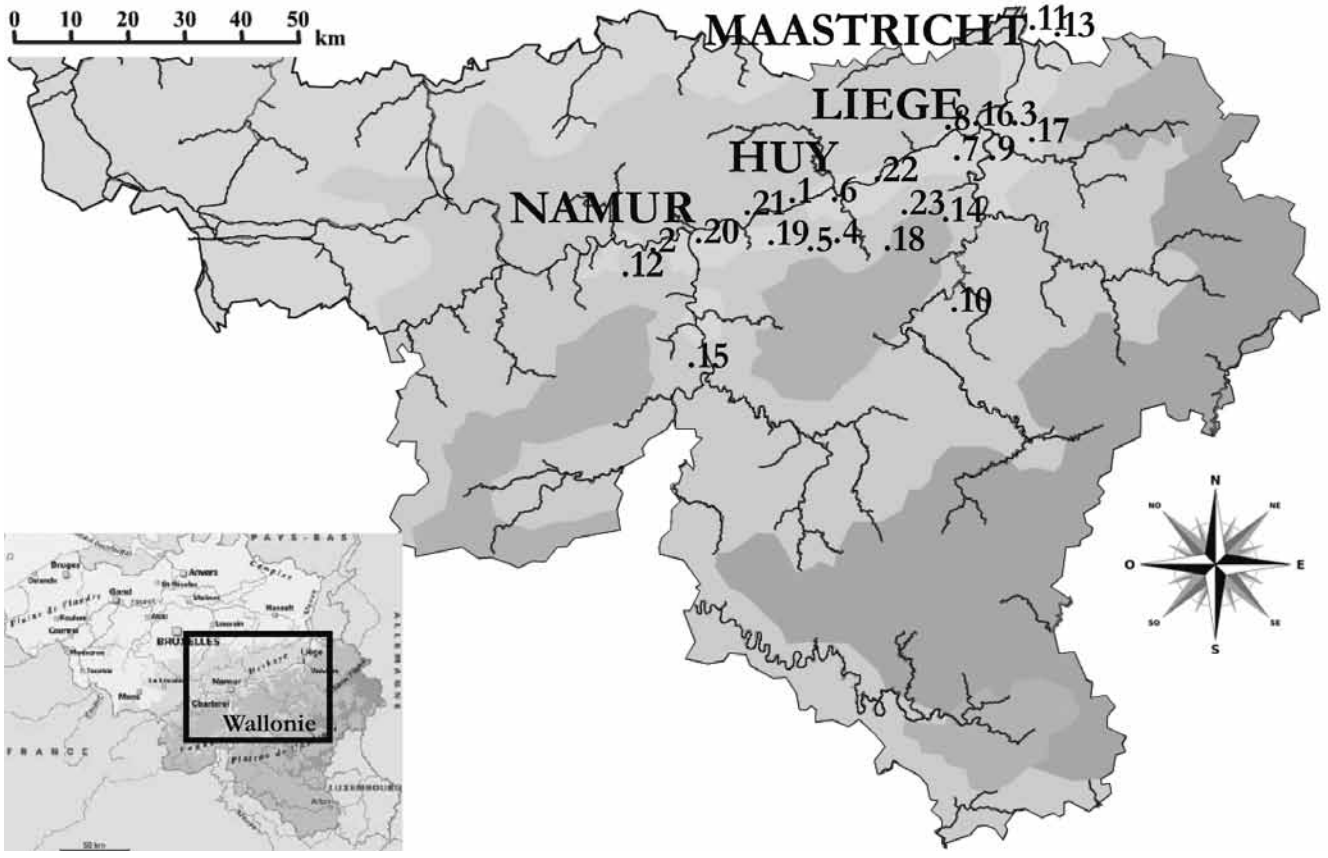


Figure 1 : Localisation des édifices et des prélèvements (Les numéros renvoient aux tableaux 1 et 2).
Figure 1: Localization of buildings and samples (Numbers refer to tables 1 and 2) (Ch. Maggi).

© Presses universitaires de Rennes

parée au cutter ou à la lame de rasoir. Les cernes de croissance sont mesurés à l'aide d'une chaîne de mesure reliée à un ordinateur ou grâce au traitement d'une image de très haute qualité traitée par un logiciel de Dessin Assisté par Ordinateur[3]. La calibration des séries de largeurs de cernes en indices de croissance, les calculs de corrélation et les inter-datations sont exécutés sur le logiciel Dendron mis au point et régulièrement perfectionné par Georges Lambert (CNRS-UMR 6249 laboratoire de chrono-environnement, Besançon) dans le cadre d'échanges de données entre divers laboratoires français, belge, hollandais, allemand, suisse et anglais. La qualité des corrélations est donnée par le coefficient de corrélation de Pearson et la valeur *t* de Student qui permettent de calculer le risque d'erreur.

L'estimation de la contemporanéité entre le bois et le fer

A défaut de sources écrites qui pourrait aider à établir la contemporanéité entre un renfort en fer et le bois sur lequel il est appliqué, il faut privilégier une approche strictement archéologique du rapport fer/bois pour soutenir ou réfuter la contemporanéité de ce couple de pièces (fig. 2). Plusieurs aspects sont alors à prendre en compte pour évaluer cette contemporanéité et dater la mise en place du renfort en fer.

Premièrement, les recherches réalisées *in-situ* démontrent que chaque phase de construction d'une charpente fait l'objet d'un traitement particulier et répétitif. Cela signifie que dans le cas d'une charpente construite en plusieurs étapes, chaque phase de construction renferme un ensemble de renforts morphologiquement homogène qui varie d'une phase à l'autre de façon plus ou moins importante en fonction du nombre d'années qui sépare l'édification des différentes phases. Ainsi, lorsqu'une charpente est construite d'une seule volée, elle ne renferme qu'une morphologie de renforts en fer.

Deuxièmement, si la charpente fait l'objet d'une réparation postérieure, les renforts employés sont la plupart du temps installés à des endroits circonscrits et ont, de plus, une morphologie différente de celle des renforts éventuellement déjà présents. Dans le même ordre d'idées, si une charpente, dont l'édification a été réalisée en plusieurs phases, ne contient qu'un seul ensemble de renforts homogène réparti entre les différentes phases, il faut conclure que cet ensemble a été mis en place *a posteriori*.

Troisièmement, certaines formes de renforts donnent des jalons chronologiques qui peuvent être comparés aux datations dendrochronologiques pour estimer la contemporanéité entre le bois et le fer. C'est spécialement le cas des renforts composés d'écrous d'au moins 1,5 centimètres de diamètre et de tiges taraudés régulièrement qui sont inévitablement postérieurs aux XVIII[e]-XIX[e] siècles.

Enfin, quatrièmement, la répétition de cette méthodologie sur les différents édifices amène à recouper les informations morphologiques dans le dessein de créer un inventaire typo-chro-



Figure 2 : Exemple d'étrier en fer dans l'église Saint-Denis à Liège renforçant l'assemblage entre un poinçon et un entrait daté par dendrochronologie du premier du tiers du XIV[e] siècle.
Figure 2: Example of iron reinforcements in Saint-Denis church in Liege at the truss between a king-post and a tie-beam dated by dendrochronology from de first third of the 14[th] century (G. Pagès).

3. Ici en l'occurrence Adobe Illustrator™.

© Presses universitaires de Rennes

nologique des renforts en fer[4]. Celui-ci permet de répondre aux questions de cohérence et d'homogénéité, de juger de la présence originelle dans l'édifice des renforts et *de facto* d'estimer leur contemporanéité ou leur postériorité par rapport au bois sur lequel ils sont appliqués. Actuellement, on discerne quatre grands types de renforts en fer employés en charpenterie : les plates-bandes, les étriers (fig. 2), les tirants et les chevilles-goujons.

Ainsi, afin de comprendre les rapports chronologiques qui lient les renforts en fer et les éléments en bois au sein d'un comble, il est primordial d'adopter cette lecture critique et cette dialectique entre les matériaux.

L'estimation des quantités de bois et de fer

L'estimation du nombre de grumes[5] utilisé dans la construction d'une charpente est fondée sur l'examen des traces d'outils et sur les mesures des sections des pièces de bois. Par l'intermédiaire de ces observations, il est possible de remonter aux dimensions des « grumes capables[6] » recherchées par le maître charpentier et ainsi d'acquérir une approximation de la quantité d'arbres abattus[7] (Bernard *et al.*, 2007). De façon à pouvoir comparer la consommation de bois entre plusieurs charpentes, les résultats obtenus en fonction de la longueur originelle des combles sont ramenés à une longueur virtuelle de 100 mètres. Cette procédure d'estimation n'est pas applicable dans tous les combles, soit parce que la charpente a subi de trop lourdes modifications soit, pour les périodes plus récentes, parce que l'équarrissage et le débitage de plus en plus poussés des arbres empêchent de remonter à la grume capable d'origine.

Le volume de bois est calculé pour une travée, ferme principale, fermes secondaires et contreventements compris, et multiplié par le nombre de travées qui composent une phase de construction. Le calcul ne prend en compte que les pièces d'origine de la charpente. En outre, il ne porte que sur les éléments forts de la charpente. Le calcul n'inclut donc pas les voligeages et de possibles planchers.

Le volume de fer est estimé pour chaque type d'éléments en fer et multiplié par le nombre de pièces se rapportant à chaque type dans chaque phase. Les seules pièces prises en compte dans le calcul sont celles dont la contemporanéité avec le bois est avérée par la démarche sus décrite. Les éléments de fixation, clous et agrafes, ne sont pas inclus dans le calcul car leur exhaustivité est souvent difficile à garantir comme leur homogénéité. L'influence de ce choix est minime au regard du volume total. Il s'agit donc bien d'une estimation *a minima* qui porte sur les éléments en fer architecturaux employés dans les combles de charpente mosans au cours du Moyen Âge et de l'Époque moderne.

Par ailleurs, la présence du fer est aussi évaluée grâce au nombre de types d'éléments en fer qui sont utilisés dans chaque phase de construction (entre plate-bande, étrier, tirant et cheville-goujon) et à partir du nombre effectif d'éléments en fer mis en œuvre dans chaque phase sans distinction typologique. Ce dernier dénombrement par éléments ferreux ne tient pas compte non plus des pièces de fixation et autres clous et agrafes. On entend par « élément » l'ensemble du système ferreux utilisé par exemple pour le renforcement d'un assemblage de bois, c'est-à-dire autant l'étrier que les clous et les agrafes qui sont nécessaires à sa fixation au bois.

Au final, pour comparer l'évolution chronologique des différentes données quantitatives (nombre de grumes utilisées, estimations volumétriques de bois et de fer, etc.), celles-ci sont présentées dans des tableaux et sous la forme d'histogrammes où les ordonnées représentent la chronologie par demi-siècles depuis le XII^e^ jusqu'au XVIII^e^ siècle, et les abscisses les données quantitatives moyennées prenant en compte les différents édifices se rapportant à chaque demi-siècle. Certains demi-siècles ne sont pas évoqués dans la présente étude, faute de témoin pour la région concernée.

L'analyse chimique semi-quantitative des inclusions piégées dans les fers

Les études archéométallurgiques conduites visent à déterminer le procédé de production des éléments ferreux mis en œuvre dans les combles pour mesurer l'incidence sur l'emploi du fer dans les charpentes médiévales de l'arrivée des productions issues de la réduction indirecte par rapport aux productions issues de la réduction directe. De fait, ces études servent aussi à alimenter nos connaissances sur la mise en place de la métallurgie du fer moderne (réduction indirecte) en lieu et place de la métallurgie ancienne (réduction directe) à la fin du Moyen Âge dans le bassin mosan et, plus largement, en Europe occidentale.

A ce jour, quarante-deux échantillons ont été analysés. Ils proviennent de trois édifices liégeois comportant neuf phases de construction de charpente datées du début de la période considérée, entre les années 1251-1252 et 1423-1424 (tableaux 2 et 3). Ces églises ont été sélectionnées pour

4. La typologie des éléments en fer n'est pas exposée dans ce présent article, mais elle constitue un pan essentiel de la recherche sur le fer des combles mosans et elle sera abordée de façon exhaustive au sein de la thèse de Christophe Maggi.

5. Tronc d'arbre coupé et ébranché qui est toujours recouvert de son écorce et pas encore équarri.

6. Terme emprunté au travail de la pierre et désignant un bloc possédant les dimensions nécessaires pour le projet de taille. Par extrapolation, le terme adapté en charpenterie désigne une grume possédant la longueur et la circonférence appropriées pour l'obtention de la pièce de bois finale.

7. La méthode mise en pratique ici est celle développée par Vincent Bernard, Frédéric Epaud et Yannick Ledigol (Bernard *et al.*, 2007).

© Presses universitaires de Rennes

Edifices	Chrono.	N°	Nb type renforts fer	Nb renforts fer	Nb échant. fer	Vol. tot. Fer charpente (m3)
Seilles, église St-Etienne	1175d	1	0	0		0
Floreffe, abbatiale - phase 1a	1180d	2	0	0		0
Floreffe, abbatiale - phase 1b	1180d		0	0		0
Liège, collégiale St-Barthélemy	1188d	3	0	0		0
Matagne, église St-Hilaire	1194d	4	0	0		0
Reppe, église St-Martin	1214d	5	0	0		0
Floreffe, abbatiale - phase 2	1235d	2	0	0		0
Huy, église St-Mort	1244d	6	0	0		0
Liège, cathédrale St-Paul - phase 1a	1252d	7	2 : étrier, plate-bande	18	11	0,015
Liège, cathédrale St-Paul - phase 1b	1252d		1 : étrier	2	1	0,001
Liège, collégiale Ste-Croix - phase 1	1253d	8	1 : étrier	3	1	0,002
Liège, collégiale Ste-Croix - phase 2	1284d		1 : étrier	7	3	0,013
Liège, cathédrale St-Paul - phase 2	1300d	7	2 : étrier, goujon-clavette clouée	4	3	0,004
Liège, collégiale St-Denis phase 1	1329d	9	3 : étrier, plate-bande/tirant, goujon-clavette simple	24	3	0,023
Liège, cathédrale St-Paul - phase 3a	1330d	7	2 : plate-bande, plate-bande	8	4	0,018
Liège, cathédrale St-Paul - phase 3b	1330d		2 : étrier, goujon-clavette clouée	6	7	0,013
Liège, collégiale Ste-Croix - phase 3	1333d	8	1 : étrier	4	3	0,006
Theux, église St-Hermes-et-Alexandre - phase 1	1375d	10	0	0		0
Maastricht, église des dominicains	1397d	11	2 : plate-bande, plate-bande	/		/
Fosses-la-Ville, collégiale St-Feuillien - phase 1	1410d	12	0	0		0
Fosses-la-Ville, collégiale St-Feuillien - phase 2	1415d		1 : pseudo-étrier	10		0,007
Liège, collégiale St-Denis phase 2	1424d	9	2 : plate-bande, plate-bande/tirant	19	6	0,021
Maastricht, basilique Notre-Dame	1436d	13	3 : 3 types de plates-bandes	/		/
Anthisnes, église St-Laurent	1464d	14	0	0		0
Saint-Gerard, église St-Pierre	1485d	15	0	0		0
Liège, basilique St-Martin phase 1	1516d	16	2 : étrier, goujon-clavette rectiligne	20		0,024
Liège, abbatiale St-Jacques	1530d	17	5 : étrier, 3 types de plate-bande, chevilles	233		0,084
Theux, église St-Hermes-et-Alexandre - phase 2	1530d	10	0	0		0
Liège, basilique St-Martin phase 2	1542d	16	2 : pseudo-étrier, plate-bande	25		0,05
Liège, basilique St-Martin phase 3	1551d		3 : pseudo-étrier, plate-bande, goujon-clavette rectiligne	112		0,126
Scry, église St-Martin	1561d	18	0	0		0
Floreffe, abbatiale - phase 3	1637d	2	3 : étrier, étrier au faux-entrait, tirant coudé	29		0,072
Bonneville, église St-Firmin	1638d	19	0	0		0
Namur, église St-Joseph	1662d	20	6 : 3 types de plate-bande, tirant coudé, goujon-clavette simple, chevilles	42		0,024
Sclayn, église St-Maurice	1723d	21	0	0		0
Amay, collégiale St-Georges-et-Ode	1765d	22	4 : 2 types de plate-bande, tirant en ceinture, goujon-clavette rectiligne	38		0,026
Ramelot, église Notre-Dame	2e 1/2 XVIIIe	23	2 : 2 types de plate-bande	12		0,002

Tableau 2 : Caractéristiques des éléments en fer des charpentes des édifices étudiés. (La lettre « d » accolée à la date signifie datation dendrochronologique)
Tableau 2: Iron reinforcements features of the studied buildings roof frame (The letter "d" after the date means a dendrochronological dating) (Ch. Maggi, G. Pagès).

© Presses universitaires de Rennes

	N°	datation	type	L x l x e (mm)	m (g)
2de moitié du XIIIe s.	LCRO9	1283-1284	plate-bande	35 x 29 x 6	24
	LCRO14	1283-1284	plate-bande	43 x 38 x 8	49
	LCRO15	1283-1284	plate-bande	43 x 32 x 10	52
	LCRO17	1255-1256	plate-bande	28 x 19 x 4	9
	LPAU1_1	1290-1300	étrier	355 x 50 x 10	1000
	LPAU1_3	1290-1300			
	LPAU1bis	1290-1300			
	LPAU2	1251-1252	étrier	95 x 36 x 8	188
	LPAU4	1251-1252	étrier	170 x 41 x 9	389
	LPAU4bis	1251-1252			
	LPAU6	1251-1252	étrier	53 x 20 x 5	27
	LPAU8	1251-1252	étrier	87 x 58 x 9	350
	LPAU10	1251-1252	étrier	39 x 43 x 8	86
	LPAU12	1251-1252	étrier	90 x 27 x 13	209
	LPAU12c	1251-1252	clou	85 x 6 x 6	24
	LPAU17	1251-1252	étrier	65 x 13 x 8	52
	LPAU18	1251-1252	étrier	35 x 27 x 15	57
	LPAU19	1251-1252	étrier	29 x 29 x 9	30
	LPAU19g	1251-1252	goujon	10 x 12 x 12	30
1er tiers du XIVe s.	LCRO1a	1332-1333	plate-bande	23 x 20 x 4	7
	LCRO1b	1332-1333	plate-bande	27 x 22 x 4	10
	LCRO3	1332-1333	plate-bande	27 x 22 x 6	13
	LDEN1_LP	1er tier XIV	plate-bande	105 x 28 x 30	428
	LDEN1_LS	1er tier XIV			
	LDEN2	1er tier XIV	plate-bande	132 x 125 x 13	780
	LPAU3_1	1328-1330	étrier	750 x 56 x 13	4050
	LPAU3_3	1328-1330			
	LPAU3bis	1328-1330			
	LPAU14	1328-1330	plate-bande	47 x 18 x 10	32
	LPAU14bis	1328-1330			
	LPAU14t	1328-1330	tenon	50 x 28 x 25	201
	LPAU16	1328-1330	étrier	56 x 16 x 9	34
	LPAU16bis	1328-1330			
	LPAU20	1328-1330	plate-bande		
	LPAU20bis	1328-1330			
	LPAU21	1328-1330	plate-bande	26 x 25 x 12	22
1er tiers du XVe s.	LDEN3	1423-1424	plate-bande	124 x 21 x 11	195
	LDEN4	1423-1424	plate-bande	50 x 27 x 14	70
	LDEN16_2	1423-1424	plate-bande	31 x 28 x 7,7	26
	LDEN17	1423-1424	plate-bande	19 x 15 x 16	18
	LDEN17c	1423-1424	clavette	18 x 18 x 7	44
	LDEN17g	1423-1424	goujon	9 x 30 x 30	47

Tableau 3 : Les échantillons ferreux analysés des églises Saint-Paul, Sainte-Croix et Saint Denis à Lège : morphologie et dimensions

Tableau 3: The analysed ferrous samples from Saint-Paul, Sainte-Croix and Saint Denis church in Liège: morphology and dimensions (G. Pagès).

© Presses universitaires de Rennes

deux raisons. D'une part, les édifices sont localisés au cœur de la zone d'étude, dans un même environnement urbain où se concentrent les richesses et les innovations, d'autre part, ils permettent d'avoir une vue cohérente sur l'utilisation du fer entre la seconde moitié du XIII^e^ siècle et le premier tiers du XV^e^ siècle, dans une fourchette chronologique qui voit l'apparition de la réduction indirecte.

Ces études nécessitent un protocole archéométrique approprié qui repose en grande partie sur la métallographie (fig. 3) et sur les analyses chimiques inclusionnaires semi-quantitatives par spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS) couplée à un microscope électronique à balayage (MEB).

La première étape de l'analyse archéométallurgique consiste à prélever des morceaux d'éléments en fer sans pour autant dénaturer l'édifice ou l'affaiblir. Par conséquent, la plupart du temps, des échantillons de l'ordre de quelques centimètres ont été prélevés (tableau 3). Cependant, onze pièces de plus grandes dimensions et n'étant plus fonctionnelles ont été soustraites en sus afin d'avoir une vue plus exhaustive sur le matériau ferreux utilisé. Les éléments en fer prélevés sont photographiés, pesés, mesurés et inventoriés.

Ensuite, à l'aide des réactifs Nital et Oberhoffer et suivant une méthodologie établie visant à examiner les échantillons dans leur globalité afin d'appréhender l'hétérogénéité des matériaux ferreux, les échantillons ont été analysés en métallographie pour préciser la qualité inclusionnaire des pièces, la présence de soudure et la répartition des différents alliages ferreux (ferrite, aciers, fer phosphoreux, etc.) (Fluzin *et al.,* 2000 ; Pagès *et al.*, 2011)[8]. Cette phase analytique est primordiale pour préparer les analyses chimiques inclu-

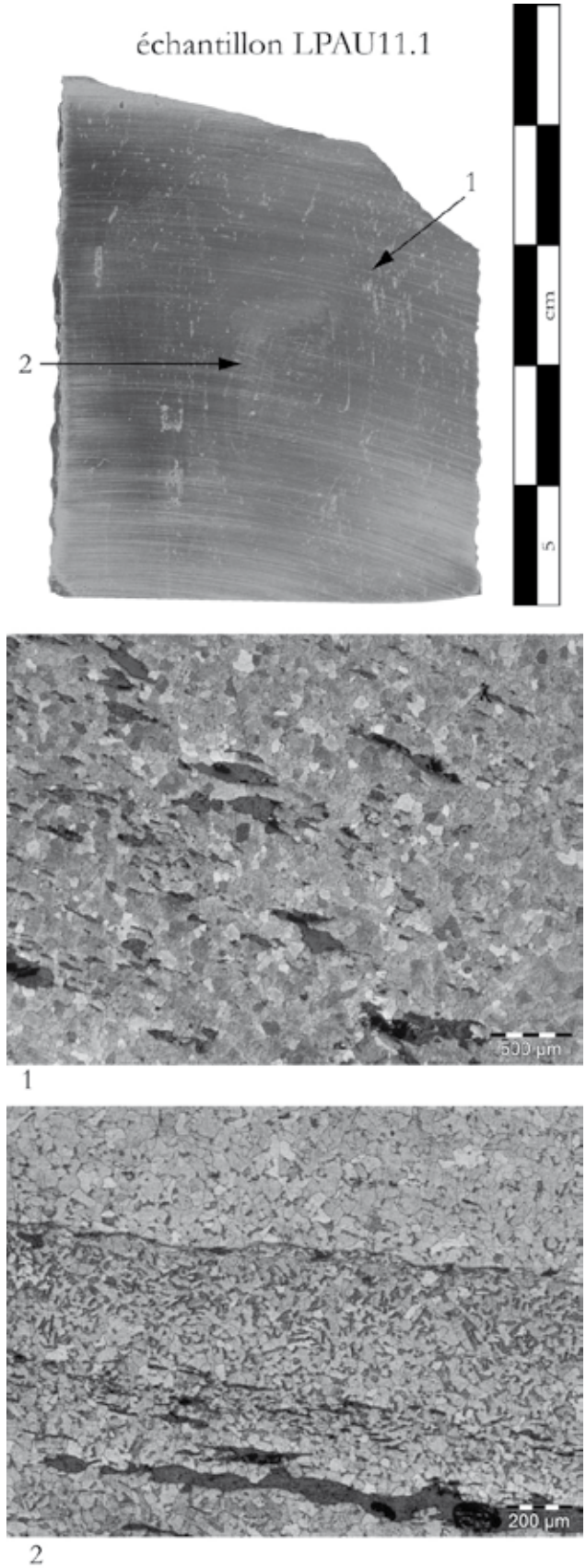


Figure 3 : Analyse métallographique du spécimen n° 11 de la cathédrale Saint-Paul à Liège (daté par dendrochronologie de 1251-1252) qui permet de distinguer des inclusions de réduction piégées dans une matrice ferritique (cliché métallographique n° 1) d'inclusions éventuellement polluées par des ajouts de forge dans une zone de soudures où se côtoient des parties ferritiques et d'autres légèrement aciérées (cliché métallographique n° 2).
Figure 3: Metallographic analysis of the sample n° 11 of the cathedral Saint-Paul in Liege (dated by dendrochronology to 1251-1252) which allows to distinguish the inclusions of reduction trapped in a ferritic matrix (metallographic image n° 1) of the inclusions possibly polluted by additions of forge in a zone of welding where are mixed some ferritic parts and other slightly steeled (metallographic image n° 2) (G. Pagès).

8. Dans cet article, nous ne détaillerons pas le volet métallographique des recherches qui fera l'objet d'une publication suite à une communication en 2010 au 38th International Symposium on Archaeometry (Tampa, Floride, USA).

© Presses universitaires de Rennes

sionnaires. En effet, elle permet de reconnaître les parties dans lesquelles les analyses inclusionnaires vont être effectuées pour éviter de mesurer des zones non représentatives (Dillmann, L'Héritier, 2007 ; Pagès *et al.*, 2011). Ainsi, par exemple, les soudures et les masses ferreuses recyclées sont identifiées et exclues des analyses chimiques étant donné que des ajouts de forgeage sont souvent présents dans ces zones et que ces derniers modifient la composition des inclusions (fig. 3). On préférera réaliser les analyses inclusionnaires au cœur des masses primaires de métal pour discriminer le procédé de réduction, entre réduction directe et réduction indirecte, selon une méthodologie reconnue et publiée (Dillmann et L'Héritier, 2007).

Cette méthodologie se fonde sur la migration différentielle de certains éléments chimiques majeurs dans les inclusions piégées dans le métal lors des phases de réduction directe et indirecte (Dillmann, L'Héritier, 2007). Plus précisément, suite à la phase de réduction, les oxydes d'aluminium, de potassium et de magnésium ne sont pas réduits. Dans le procédé direct, ces éléments se retrouvent dans les scories, et par conséquent dans les inclusions piégées dans le métal. Dans le procédé indirect, ils passent très largement dans les laitiers, si bien qu'ils se retrouvent en faible quantité dans les inclusions piégées dans le métal. Quant au phosphore, il se comporte différemment puisqu'il s'agit d'un élément réduit : il migre autant dans le métal que dans la scorie. Il est donc présent dans les inclusions issues des deux filières. Cependant, au cours des opérations d'affinage[9] qui jalonnent la filière indirecte, le phosphore est réoxydé notamment dans les inclusions qui présentent alors des concentrations très élevées en phosphore contrairement à celles associées à la filière directe. Ainsi, suivant ces différents comportements, il est possible de distinguer les procédés de réduction à l'aide d'un abaque représentant, en ordonnée, les teneurs en phosphore et, en abscisse, la somme des teneurs en aluminium, potassium et magnésium pondérée par les teneurs en fer. Notons qu'il existe une zone intermédiaire indéterminée où il est impossible de définir le système de réduction (Dillmann et L'Héritier, 2007) (fig. 8 à 10).

Pour mesurer les teneurs des composés chimiques constituant les inclusions, nous avons utilisé le MEB (Philips de modèle FEG-ESEM XL30) du Center for Applied Technology in Microscopy (Catμ) de l'Université de Liège. Son détecteur EDS (spectromètre EDAX équipé d'un détecteur Si/Li) est équipé d'une fenêtre mince qui permet de doser tous les éléments chimiques majeurs, dont le numéro atomique est supérieur ou égal à celui de l'oxygène, avec une bonne précision si leur teneur en masse est supérieure à 1 % – de l'ordre de 2 % d'erreur relative. La tension d'accélération des électrons est de 15 keV. Les teneurs massiques sont exprimées en équivalant oxyde et normalisées à 100.

Pour que les résultats soient significatifs et permettent la distinction et l'élimination des inclusions parasites qui proviennent d'ajouts, d'épiphénomènes divers ou d'effets de concentration locale[10], une trentaine d'inclusions de section supérieure à 20 μm^2 ont été analysées par échantillons (tab. 4). Aussi, dans notre étude près de mille deux cents mesures MEB-EDS ont été réalisées pour analyser les éléments chimiques majeurs des inclusions des quarante-deux spécimens sélectionnés. Pour faciliter le maniement de ces données, une moyenne des mesures des pourcentages massiques est calculée. Elle est pondérée par rapport à la surface de l'inclusion analysée et signalée par un astérisque pour la différencier des autres moyennes ($\%_{mass}$*), toujours suivant la méthodologie publiée (Dillmann et L'Héritier, 2007).

4. Résultats

Évolution de la consommation en bois

Suivant le protocole décrit, le graphique représentant l'évolution de la consommation en bois (fig. 4) rend compte d'une forte diminution de la quantité de grumes consommées pour la réalisation des charpentes entre le XII^e^ et le XVIII^e^ siècles, de 650 à environs 250 arbres abattus pour la construction de charpentes d'une longueur de 100 mètres. La première époque de décroissance apparaît à la transition entre l'architecture à caractère roman et l'architecture à caractère gothique[11], c'est-à-dire dans le courant du XIII^e^ et du XIV^e^ siècles. Ensuite, durant la période s'étalant du XIV^e^ siècle jusqu'à la seconde moitié du XVI^e^ siècle, la quantité de grumes consommées demeure relativement constante. Il faut attendre la transition entre le XVI^e^ et le XVII^e^ siècles pour voir une nouvelle époque de décroissance du nombre de grumes consommées. Cette seconde diminution est très importante, notamment par rapport à celle du XIII^e^ siècle, puisque la consommation chute alors de moitié.

9. Selon le lexique publié dans Mangin 2004 ce terme est réservé au procédé indirect et désigne la transformation de la fonte en acier ou en fer par oxydation du carbone suite à la phase de réduction en haut fourneau.

10. L'élimination des mesures inclusionnaires non significatives ou parasites est réalisée pour chaque échantillon à partir d'un histogramme en fréquence des rapports $\%_{mass}Al_2O_3/\%_{mass}SiO_2$ et du graphique $\%_{mass}Al_2O_3/\%_{mass}SiO_2$ des mesures en utilisant le coefficient de détermination (R^2) de la courbe de régression linéaire.

11. Dans la région concernée par l'étude, une charpente de conception « romane » est, de façon générale, caractérisée par un toit à pente douce (±45°) à chevrons-arbalétriers, poteaux, entrait et faux-entrait. Une charpente de conception « gothique » est, de façon générale, caractérisée par un toit à pente forte (±60°) à chevrons-arbalétriers ou chevrons et arbalétriers, poinçon, entrait, faux-entraits et contreventement (Hoffsummer, 2002).

© Presses universitaires de Rennes

Demi-siècles	Nb édifices	Moy. nb grumes rapporté à 100 m.
2e XII	5	655
1er XIII	3	616
2e XIII	4	610
1er XIV	4	542
2e XIV	/	/
1er XV	3	563
2e XV	/	/
1er XVI	4	591
2e XVI	2	586
1er XVII	2	298
2e XVII	1	257
1er XVIII	/	/
2e XVIII	2	264

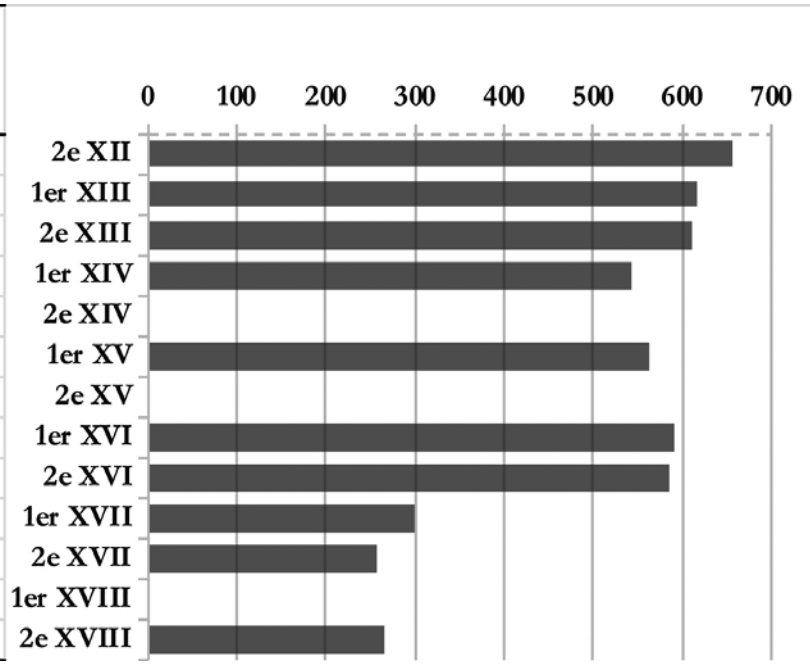


Figure 4 : Évolution de la consommation en bois.
Figure 4: Evolution of wood consumption (Ch. Maggi).

Évolution du pourcentage de volume de bois sur le volume de la charpente

Comme pour l'évolution de la consommation en bois, on constate une décroissance du XII^e^ au XVIII^e^ siècle du pourcentage de volume de bois par rapport au volume de la charpente : de plus de 6 % à environ 3,7 % (fig. 5). Ici, la diminution est surtout visible à la transition entre l'« architecture romane » et l'« architecture gothique », aux XIII^e^ et XIV^e^ siècles. S'en suit une phase de stabilisation durant la période comprise entre le XIII^e^ et le XVII^e^ siècles où le pourcentage de volume de bois par rapport au volume de la charpente oscille légèrement au dessus de 4 % avec localement un pic à 6 %. Le XVIII^e^ siècle semble être marqué par une nouvelle phase de fléchissement du pourcentage du volume de bois par rapport au volume de la charpente qui passe alors à 3,7 %, ce dernier pourcentage étant la moyenne la plus basse enregistrée.

Évolution du pourcentage du volume de fer sur le volume de la charpente

Le plus ancien renfort en fer répertorié dans un comble de la région mosane est daté de 1252. Il est situé dans le transept de la cathédrale Saint-Paul à Liège où il renforce l'assemblage entre un entrait et un poinçon dans une charpente à chevrons formant fermes de conception typiquement gothique. Les observations menées dans des charpentes de typologie romane ont effectivement révélé l'absence récurrente d'éléments en fer originels. L'utilisation du fer dans la charpente de comble semble donc apparaître de pair avec l'avènement de l'« architecture gothique » (tableau 2 et fig. 6).

Suite à l'apparition de l'emploi du fer en charpenterie durant la seconde moitié du XIII^e^ siècle, la pratique connaît une phase d'assimilation et de développement entre le XIV^e^ et la fin du XVI^e^ siècles. Ce phénomène est visible dans le rapport entre le volume de fer et le volume de la charpente. Il est aussi nettement perceptible dans le rapport entre le nombre d'éléments en fer et le volume de bois (tableau 2 et fig. 6 et 7), ce qui prouve que cette accroissement n'est pas dû à l'amplification des dimensions des renforts, mais bien à la multiplication de leurs usages.

Cependant, si l'emploi du fer en charpenterie se développe de façon régulière, cet usage ne devient pas systématique pour autant et certaines charpentes sont toujours construites sans faire l'usage d'aucun renfort jusqu'au XVIII^e^ siècle (tableau 2). Aux alentours des XVII^e^ et XVIII^e^ siècles, cette pratique connaît néanmoins un essor intensif et se retrouve utilisée massivement et pratiquement systématique-

© Presses universitaires de Rennes

Demi-siècles	Nb édifices	Moy. Vol. bois / Vol. charpente
2e XII	5	6,23%
1er XIII	3	5,90%
2e XIII	4	4,89%
1er XIV	4	4,54%
2e XIV	/	/
1er XV	3	6,07%
2e XV	/	/
1er XVI	4	4,07%
2e XVI	2	4,14%
1er XVII	2	4%
2e XVII	1	4,12%
1er XVIII	/	/
2e XVIII	2	3,69%

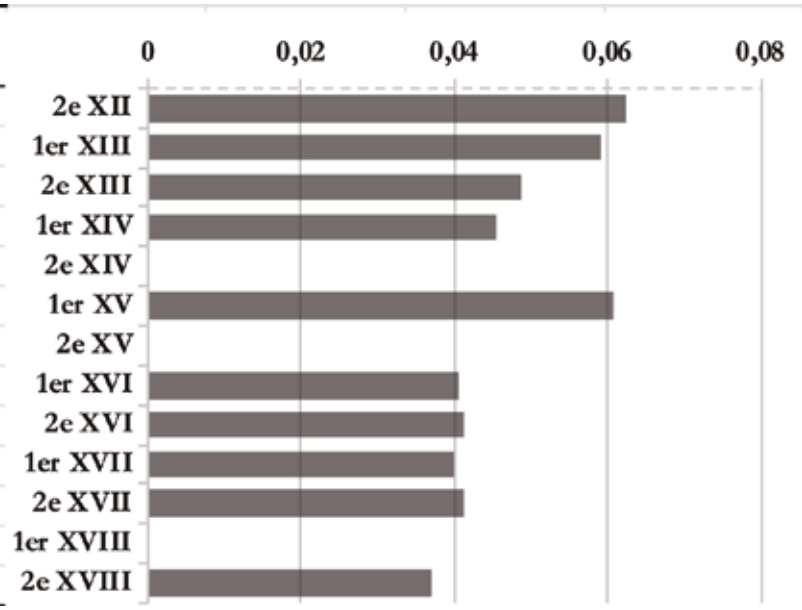


Figure 5 : Évolution du pourcentage de volume de bois sur le volume de la charpente.
Figure 5: Evolution of the percentage of the volume of wood on the volume of the frame (Ch. Maggi).

Demi-siècles	Nb édifices	Moy. Vol. fer / Vol. charpente
2e XII	5	0,0000%
1er XIII	3	0,0000%
2e XIII	4	0,0008%
1er XIV	4	0,0020%
2e XIV	/	/
1er XV	3	0,0025%
2e XV	/	/
1er XVI	4	0,0027%
2e XVI	2	0,0029%
1er XVII	2	0,0028%
2e XVII	1	0,0017%
1er XVIII	/	/
2e XVIII	2	0,0043%

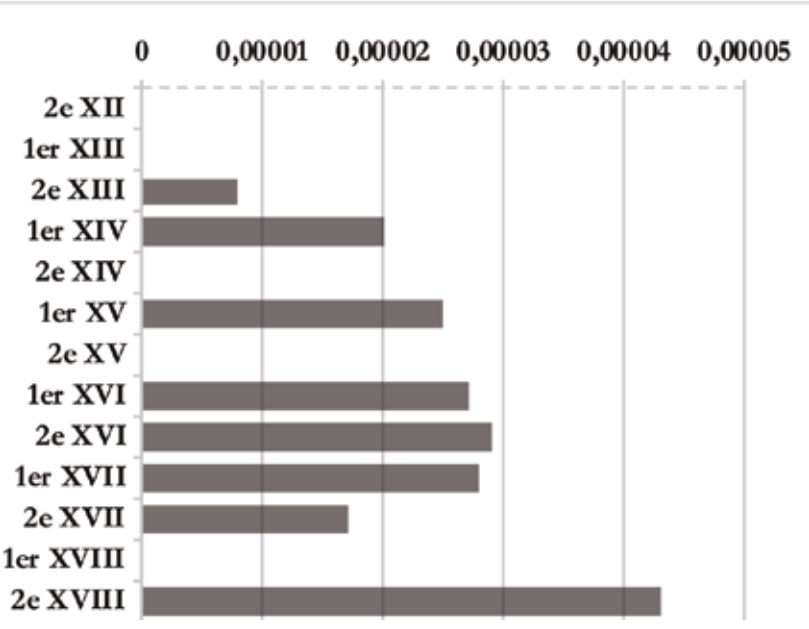


Figure 6 : Évolution du pourcentage du volume de fer sur le volume de la charpente.
Figure 6: Evolution of the percentage of the volume of iron on the volume of the frame (Ch. Maggi).

© Presses universitaires de Rennes

Demi-siècles	Nb édifices	Moy. nbre éléments fer / Vol. bois
2e XII	5	0
1er XIII	3	0
2e XIII	4	0,16
1er XIV	4	0,23
2e XIV	/	0
1er XV	3	0,42
2e XV	/	0
1er XVI	4	0,58
2e XVI	2	0,55
1er XVII	2	0,28
2e XVII	1	0,74
1er XVIII	/	0
2e XVIII	2	2

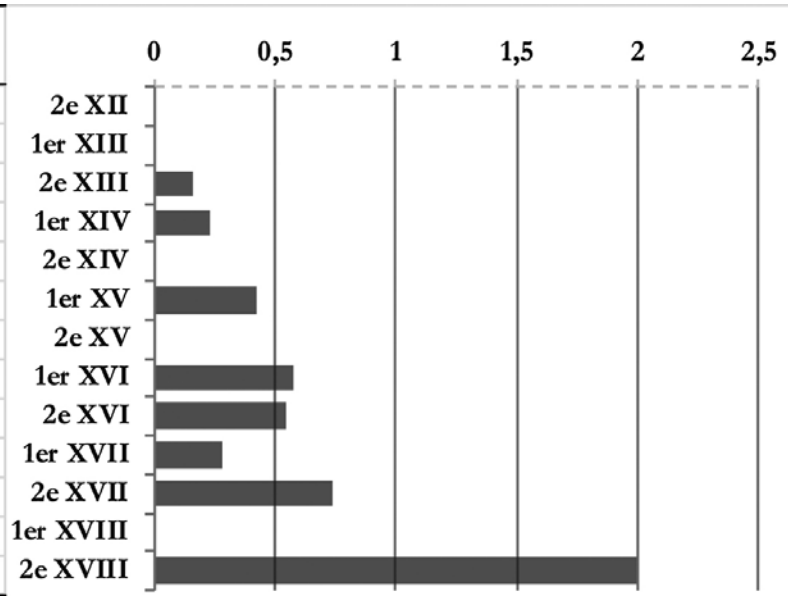


Figure 7 : Évolution du nombre d'éléments en fer par rapport au volume de bois.
Figure 7: Evolution of the number of iron elements compared to the volume of wood (Ch. Maggi).

ment (tableau 2 et fig. 6 et 7). Ce long processus est couplé dans le même temps à la multiplication des types de renforts (tableau 2). Alors que du XIIIe siècle au XVe siècle inclus, une charpente contient en moyenne un ou deux types de renforts distincts, à partir du XVIe et surtout au XVIIe siècle, ce nombre augmente et certaines charpentes renferment jusqu'à cinq ou six types de pièce en fer jouant chacun un rôle différent. Aux XVIIe et XVIIIe siècles, le fer prend ainsi de plus en plus d'importance dans la conception des charpentes.

Évolution du procédé de fabrication des fers de charpente, entre réduction directe et indirecte

Aucun spécimen des quarante-deux prélèvements ferreux réalisés dans neuf phases de construction de trois charpentes liégeoises n'est issu de recyclage. Aucun échantillon n'a donc été soustrait au raisonnement, bien que certaines zones de soudures aient été nettement identifiées et, de fait, mises à l'écart des mesures MEB-EDS. Cependant, dix échantillons sur les quarante-deux analysés n'apparaissent pas dans les résultats parce que les inclusions mesurées n'étaient pas assez nombreuses ou les mesures trop hétérogènes pour être significatives (tableau 4).

Ainsi, selon les analyses chimiques des éléments majeurs piégés dans les inclusions des trente-deux échantillons analysés restant, la totalité du fer fabriquée dans la seconde moitié du XIIIe siècle est issue du procédé direct (6 des 14 pièces analysées se trouvent dans la zone indéterminée) (fig. 8). Cette conclusion est conforme à ce qui est connu par ailleurs. En revanche, dans le premier tiers du siècle suivant, au XIVe siècle, la situation est différente. Deux spécimens (LPAU14 et LDEN1_LP) issus de deux édifices différents (Saint-Paul et Saint-Denis à Liège) proviennent de la filière indirecte, alors que trois spécimens sont issus de la filière directe (fig. 9). Les sept autres se trouvent dans la zone indéterminée. On ne peut donc rien affirmer à leur sujet. Les deux spécimens issus de la filière indirecte sont datés du premier tiers du XIVe siècle. Il s'agit donc là des plus vieux témoins de l'utilisation de fer issu du procédé indirect en Wallonie et peut-être de production indirecte dans la région (Pasquasy, 2005). En conséquence, on peut supposer que les productions issues de la réduction indirecte sont utilisées en Wallonie à partir du premier tiers du XIVe siècle. Cependant, les réseaux d'approvisionnement restaient très diversifiés, puisque les deux filières de production pouvaient entrer en jeu. Pour le premier tiers du XVe siècle, les résultats sont aussi très surprenants. En effet, ici, quatre spécimens proviennent de la filière directe, alors qu'aucun n'est issu du procédé indirect (fig. 10). Seuls deux autres spécimens se trouvent dans la zone indéterminée, il est donc impossible de se prononcer à leur sujet. Aussi, si la distribution de fer issu du procédé indirecte en Wallonie est intervenue tôt dans le XIVe siècle, les productions de réduction directe restent très importantes et encore largement majoritaires au début du XVe siècle.

© Presses universitaires de Rennes

	N°	datation	Na2O*	MgO*	Al2O3*	SiO2*	P2O5*	SO2*	ClO*	K2O*	CaO*	TiO2*	V2O5*	Cr2O3*	MnO*	FeO*	nombre de mesures	surface totale dosée (µm2)
2de moitié du XIIIe s.	LCRO9	1283-1284	0,25	0,93	3,46	19,36	3,32	0,79	0,41	1,48	2,32	0,65	0,45	0,30	0,89	65,31	30	34794
	LCRO14	1283-1284	0,25	0,58	5,78	29,71	2,25	0,25	0,25	1,26	3,06	0,40	0,28	0,27	6,80	49,96	30	32632
	LCRO15	1283-1284	0,25	0,93	5,00	14,66	1,66	1,26	0,43	1,05	1,52	0,69	0,47	0,53	1,26	70,40	31	7612
	LCRO17	1255-1256	0,25	1,17	7,05	23,38	1,77	0,25	0,25	2,09	2,18	0,57	0,43	0,37	2,46	58,34	30	55376
	LPAU1_1	1290-1300	0,39	0,91	1,70	11,44	7,66	0,27	0,25	0,32	1,71	0,25	0,25	0,25	6,63	68,01	34	157579
	LPAU1_3	1290-1300	0,33	1,01	2,67	17,00	6,14	0,26	0,25	0,64	1,99	0,31	0,25	0,25	6,75	62,22	28	117025
	LPAU1bis	1290-1300	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	30	37249
	LPAU2	1251-1252	0,61	1,25	2,83	20,70	7,01	0,67	0,25	0,76	1,76	0,41	0,25	0,25	4,79	58,53	21	96900
	LPAU4	1251-1252	0,79	1,28	7,72	20,67	3,14	0,93	0,25	1,79	1,93	0,31	0,25	0,25	0,74	60,12	25	482479
	LPAU4bis	1251-1252	0,25	1,42	7,96	25,89	3,98	0,25	0,25	2,71	2,43	0,43	0,34	0,30	0,97	53,73	30	75814
	LPAU6	1251-1252	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	37	141325
	LPAU8	1251-1252	0,41	2,79	2,12	29,61	3,86	0,45	0,25	1,86	9,79	0,43	0,69	0,34	1,89	45,61	26	208400
	LPAU10	1251-1252	0,52	1,13	1,99	11,02	8,58	0,39	0,25	0,38	2,90	0,25	0,25	0,25	5,07	67,01	42	363600
	LPAU12	1251-1252	0,25	1,45	9,25	23,60	4,89	1,09	0,40	2,44	2,42	0,95	0,51	0,47	2,07	50,28	30	24876
	LPAU12c	1251-1252	0,25	2,73	4,33	55,91	1,11	0,68	0,25	1,74	6,74	0,99	0,34	0,34	5,19	19,70	14	1450
	LPAU17	1251-1252	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	30	28960
	LPAU18	1251-1252	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	30	28526
	LPAU19	1251-1252	0,25	1,79	1,38	24,27	8,99	1,04	0,32	1,31	3,90	0,66	1,09	0,48	2,02	52,63	30	30334
	LPAU19g	1251-1252	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	30	13982
1er tiers du XIVe s.	LCRO1a	1332-1333	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	30	76712
	LCRO1b	1332-1333	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	30	16553
	LCRO3	1332-1333	0,25	0,84	2,63	14,95	9,98	0,25	0,25	0,49	1,14	0,34	0,28	0,26	1,91	67,05	30	36034
	LDEN1_LP	1er tier XIV	0,54	0,62	1,09	2,90	10,61	0,68	0,25	0,30	0,34	0,33	0,31	0,28	1,14	80,77	29	4133
	LDEN1_LS	1er tier XIV	0,80	1,70	6,08	33,50	2,06	0,46	0,25	2,20	3,26	0,36	0,25	0,25	1,38	47,76	23	297500
	LDEN2	1er tier XIV	0,53	1,62	4,23	19,43	10,39	0,65	0,25	1,31	3,85	0,25	0,25	0,25	2,85	54,21	25	77200
	LPAU3_1	1328-1330	0,49	1,46	5,79	27,60	9,48	0,55	0,25	1,04	3,66	0,40	0,25	0,25	6,84	41,99	21	15300
	LPAU3_3	1328-1330	0,69	1,27	2,62	16,60	9,77	0,56	0,25	0,59	1,98	0,27	0,25	0,25	3,46	61,43	35	216254
	LPAU3bis	1328-1330	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	30	139948
	LPAU14	1328-1330	0,28	0,68	1,93	13,18	10,45	0,34	0,25	0,26	1,36	0,25	0,25	0,25	3,09	67,35	28	189304
	LPAU14bis	1328-1330	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	29	128917
	LPAU14t	1328-1330	0,48	2,18	12,04	40,37	0,72	0,33	0,25	3,58	4,50	0,55	0,25	0,25	0,79	33,87	20	27725
	LPAU16	1328-1330	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	ind.	26	43700
	LPAU16bis	1328-1330	0,25	0,64	1,90	10,73	9,21	0,25	0,25	0,32	1,35	0,30	0,33	0,34	3,33	71,15	30	102760
	LPAU20	1328-1330	0,57	1,22	10,06	25,10	1,62	0,40	0,25	1,37	1,22	0,50	0,25	0,25	2,66	54,60	26	97325
	LPAU20bis	1328-1330	0,25	1,24	6,16	21,83	7,76	0,25	0,25	1,36	1,66	0,35	0,28	0,25	0,64	58,15	28	75524
	LPAU21	1328-1330	0,25	0,76	1,80	8,76	2,49	0,95	0,63	1,27	1,27	0,61	0,47	0,57	0,86	79,46	14	9536
1er tiers du XVe s.	LDEN3	1423-1424	0,64	1,90	5,11	41,99	3,42	0,56	0,25	1,80	3,31	0,54	0,38	0,35	5,86	34,00	30	60825
	LDEN4	1423-1424	0,45	0,89	1,89	16,19	4,72	1,16	0,25	0,51	1,38	0,25	0,25	0,25	1,70	70,40	25	124000
	LDEN16_2	1423-1424	0,25	1,38	4,87	28,46	4,02	0,25	0,25	1,75	3,29	0,46	0,29	0,27	3,59	51,46	30	143344
	LDEN17	1423-1424	0,25	2,21	5,57	46,28	2,05	0,70	0,30	2,07	3,28	0,72	0,28	0,31	3,15	32,88	30	17115
	LDEN17c	1423-1424	0,25	1,16	2,49	14,19	4,16	1,37	0,82	0,90	1,90	0,70	0,54	0,51	3,60	67,55	30	61511
	LDEN17g	1423-1424	0,25	1,26	6,51	29,87	2,87	2,05	0,31	1,65	2,52	0,74	0,41	0,33	1,93	49,31	30	32123

Tableau 4 : Composition inclusionnaire en éléments chimiques majeurs des 42 échantillons ferreux : synthèse des moyennes pondérées des mesures MEB-EDS.
Tableau 4: Slag inclusion composition for detected compounds (weighted content) for each analysed ferrous samples (G. Pagès).

5. Discussion

Fers et bois dans les charpentes de comble : premiers jalons d'une évolution

Les évolutions de la consommation en bois et du pourcentage du volume de bois sur le volume de la charpente connaissent deux phases de décroissance identiques : une première aux XIII-XIVe siècles et une seconde entre le XVIe et le XVIIIe siècles. Cependant, la décroissance du pourcentage du volume de bois sur le volume de la charpente est beaucoup plus forte aux XIIIe-XIVe siècles alors que la baisse la consommation en bois est nettement plus marquée aux XVIe-XVIIe siècles. On comprend dès lors que les origines de ces deux phénomènes sont à chercher dans des causes différentes.

Aux XIII-XIVe siècles, la décroissance importante du pourcentage du volume de bois sur le volume de la charpente et le faible infléchissement de la consommation en bois apparaissent au moment de la transition entre l'architecture à caractère roman et l'architecture à caractère gothique. Il semble donc que ces phénomènes doivent être mis en relation avec les modifications typologiques des charpentes qui surviennent à l'avènement de l'« architecture gothique ».

© Presses universitaires de Rennes

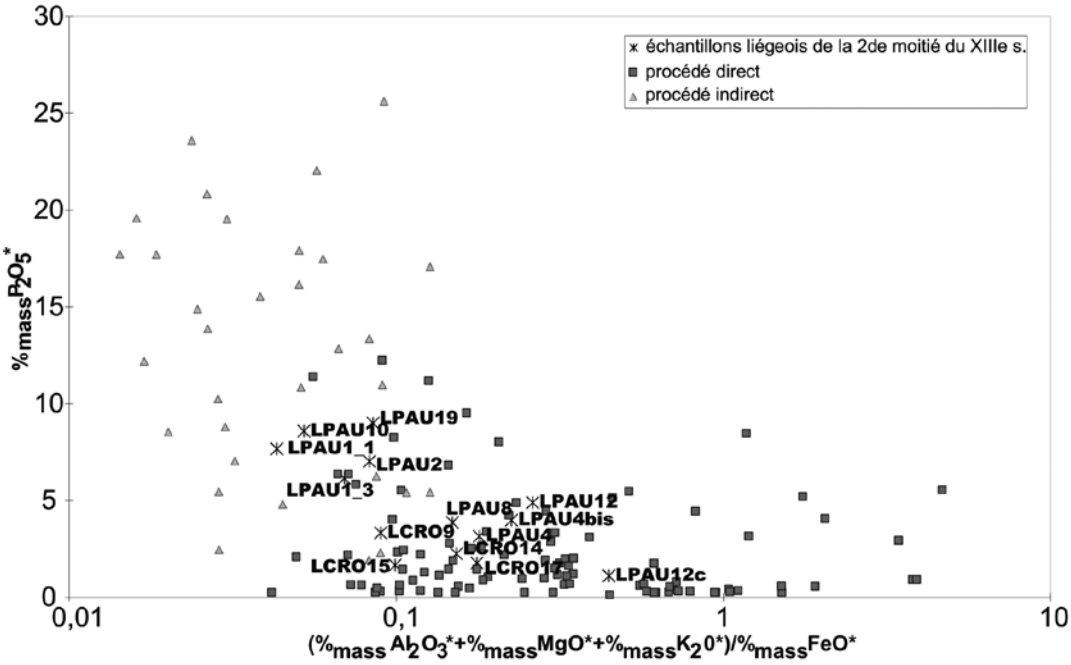


Figure 8 : Abaque permettant de discriminer le système de production duquel sont issus les spécimens ferreux liégeois de la seconde moitié du XIIIe siècle, entre réduction directe et réduction indirecte.
Figure 8: Abacus allowing to discriminate the system of production from which result the ferrous samples of Liege from the second half of the 13th century, between direct reduction and indirect (G. Pagès, d'après Dillmann, L'Héritier, 2007).

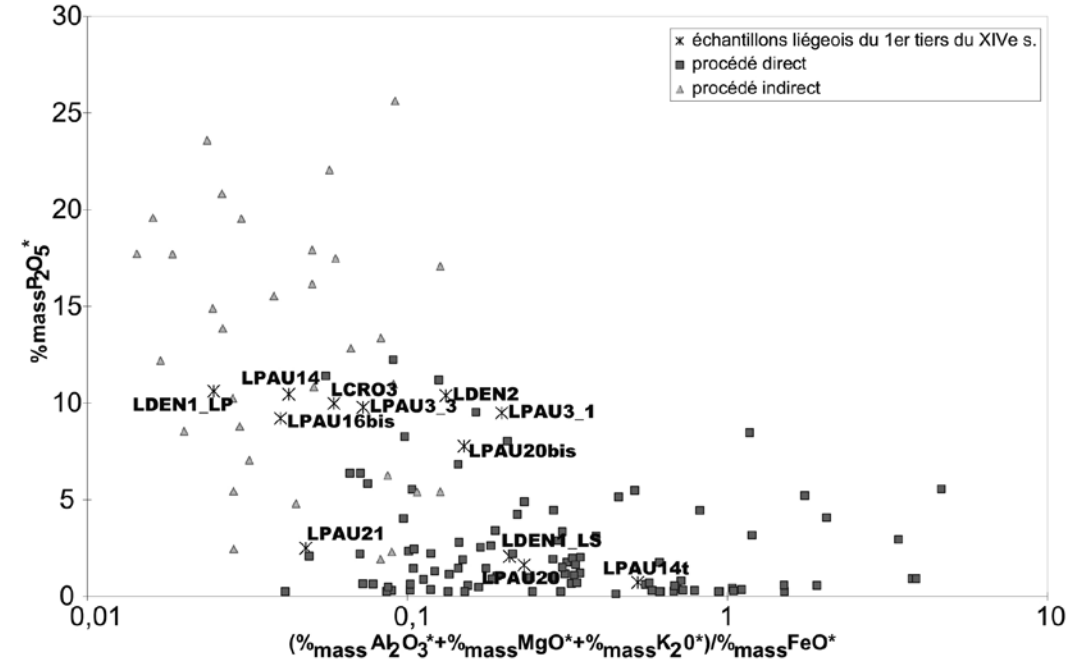


Figure 9 : Abaque permettant de discriminer le système de production duquel sont issus les spécimens ferreux liégeois du premier tiers du XIVe siècle, entre réduction directe et réduction indirecte
Figure 9: Abacus allowing to discriminate the system of production from which result the ferrous samples of Liege from the first third of the 14th century, between direct reduction and indirect (G. Pagès, d'après Dillmann, L'Héritier, 2007).

La mise en œuvre de structures tramées, l'emploi de pièces de contreventement et l'économie de poteaux permettent de libérer de l'espace et d'allonger la distance entre chaque ferme (Hoffsummer, 2002), favorisant ainsi l'économie de bois-d'œuvre malgré la mise en place de charpentes toujours plus hautes et plus volumineuses (fig. 11).

Aux XVIIe-XVIIIe siècles, la forte diminution observée dans la consommation de grumes et la faible décroissance du pour-

© Presses universitaires de Rennes

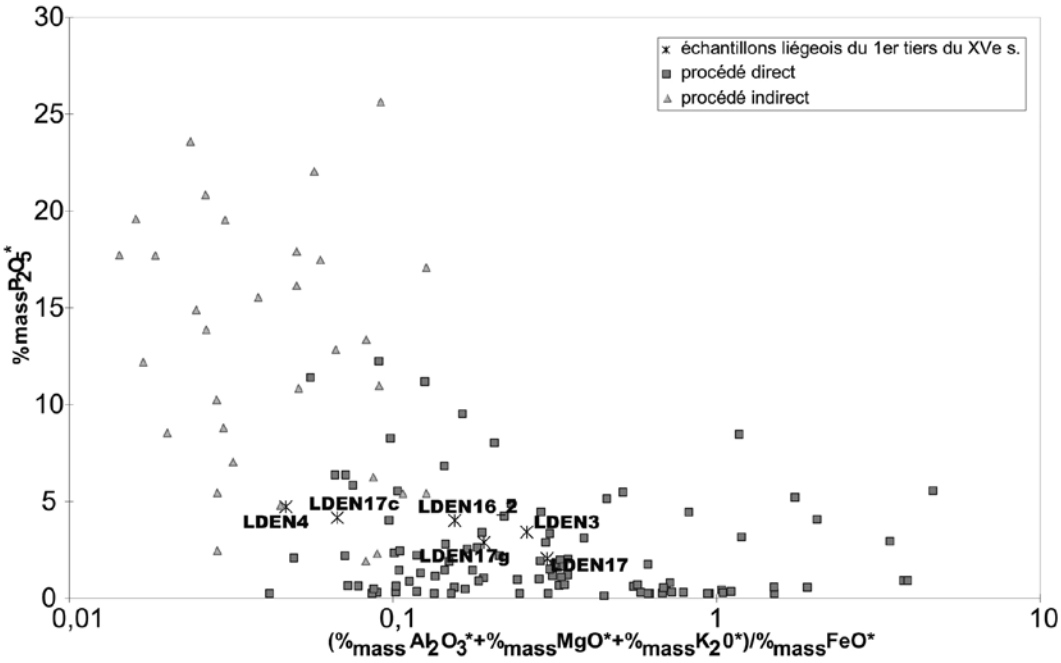


Figure 10 : Abaque permettant de discriminer le système de production duquel sont issus les spécimens ferreux liégeois du premier tiers du XV^e siècle, entre réduction directe et réduction indirecte.
Figure 10: Abacus allowing to discriminate the system of production from which result the ferrous samples of Liege from the first third of the 15th century, between direct reduction and indirect (G. Pagès, d'après Dillmann, L'Héritier, 2007).

Demi-siècles	Nb édifices	Moy. Aires combles (m^2)
2e XII	5	30,2
1er XIII	3	23,4
2e XIII	4	51,2
1er XIV	4	56
2e XIV	/	/
1er XV	3	42,4
2e XV	/	/
1er XVI	4	53,7
2e XVI	2	40,6
1er XVII	2	27,8
2e XVII	1	39,6
1er XVIII	/	/
2e XVIII	2	21,4

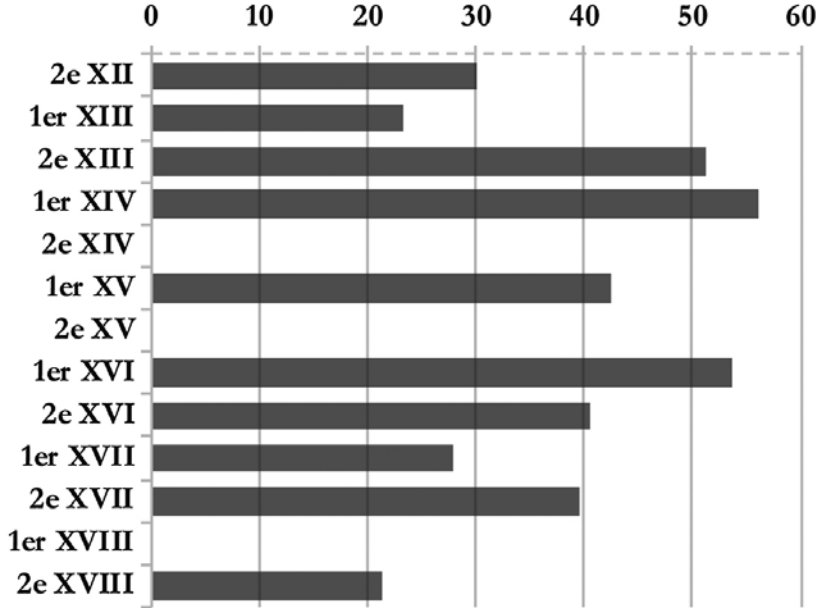


Figure 11 : Moyennes des aires (en m^2) des combles étudiés.
Figure 11: Averages of areas (in m^2) of the stutied roofs. (Ch. Maggi).

© Presses universitaires de Rennes

centage du volume de bois sur le volume de la charpente pourrait respectivement être la conséquence de la réduction générale des dimensions des combles (l. x h.) (fig. 11), et d'une nouvelle modification importante des techniques de construction mettant en œuvre davantage de bois de faible longueur et de forte section (fig. 12). Aux alentours des XV^e^-XVI^e^ siècles, les forêts sont clairsemées (Williams, 2000). Avec le manque de compétition, les arbres ont plus tendance à grossir qu'à grandir. Les plus longs arbres vont être conservés pour des usages privilégiés et des pièces particulières comme les entraits ou la charpenterie marine alors en plein développement dans les Pays-Bas (Suttor, 1999). D'ailleurs, la circonférence des grumes capables utilisées dans les charpentes de combles augmente très fortement entre le XV^e^ et le XVIII^e^ siècles et dépasse majoritairement les 30 centimètres à partir du XV^e^ siècle (fig. 12). Dans son traité de 1702, La Hire distingue clairement ce qu'il appelle deux sortes de bois : les « Bois de Brin » et les « Bois de Sciage ». Les premiers sont employés « pour être mis en œuvre de leur grosseur » alors que les seconds « se débitent ordinairement de bois courts et gros » (La Hire, 1702). Comme cela a été observé par ailleurs (Hunot, 2001), c'est également au XV^e^ siècle que l'usage de la scie devient de plus en plus intense car elle simplifie et accélère le débitage de ces grosses grumes en de multiples pièces. L'élargissement des grumes et la réduction de leur longueur vont donc avoir une incidence directe sur les typologies des charpentes et sur les dimensions des combles (l. x h.) qui sont alors revues à la baisse (fig. 11) (Hoffsummer, 1995). En outre, l'emploi de ces grosses grumes débitées explique, du moins en partie, la constance aux XVI^e^ et XVII^e^ siècles du pourcentage du volume de bois sur le volume de la charpente (fig. 5), ce type de grume permettant de mettre en œuvre moins d'arbre pour un même pourcentage de volume de bois utilisé dans la charpente.

L'utilisation de renforts en fer dans une charpente à partir du XIII^e^ siècle semble être à mettre en parallèle avec l'avènement de l'« architecture gothique » qui s'accompagne d'une modification importante des conceptions de charpentes et des typologies de fermes, ainsi que d'une augmentation générale des dimensions des combles (fig. 11) et de l'inclinaison des toits. Le bois occupe alors un espace moins important dans des combles qui deviennent plus dégagés (fig. 4). L'installation des pièces en fer semblerait donc répondre, au moins en partie, à un sentiment de précaution et à la volonté de renforcer les assemblages au cas où surviendraient des turbulences. En effet, avec l'augmentation des dimensions des combles et des pentes des toits dans l'« architecture gothique », la prise au vent est plus importante et augmente les risques de déchaussement des assemblages et d'inclinaison des fermes.

Par la suite, l'usage de renforts en fer dans la charpenterie de comble ne cesse d'augmenter du XIII^e^ au XVIII^e^ siècle comme le montrent autant le pourcentage du volume de fer

Demi-siècles	Nb édifices	% grumes sections ≥ 30cm
2e XII	5	30%
1er XIII	3	14%
2e XIII	4	21%
1er XIV	4	25%
2e XIV	/	/
1er XV	3	75%
2e XV	/	/
1er XVI	4	42%
2e XVI	2	63%
1er XVII	2	90%
2e XVII	1	100%
1er XVIII	/	/
2e XVIII	2	94%

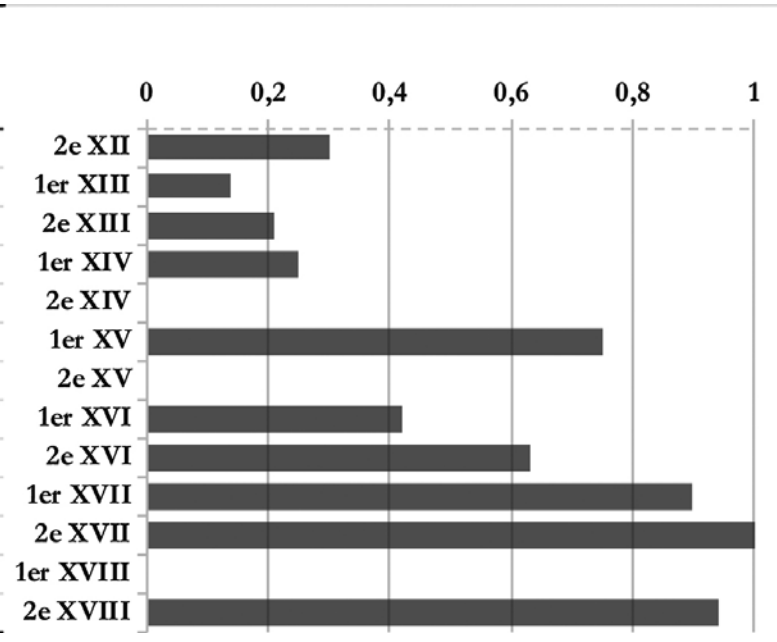


Figure 12 : Évolution du pourcentage de grumes de sections ≥ 30 cm utilisées dans les charpentes de comble.
Figure 12: Evolution of the percentage of barks of sections ≥ 30 cm used in the frames of roofs (Ch. Maggi).

© Presses universitaires de Rennes

sur celui de la charpente que la quantité d'éléments en fer sur le volume du bois (tableau 2 et fig. 6 et 7). L'utilisation plus importante et diversifiée du fer en charpenterie aux Temps modernes semblerait donc être la conséquence d'un processus de longue durée, où le fer s'impose de plus en plus comme un élément constitutif de la charpente. Ce phénomène pourrait peut-être être stimulé par la mise en œuvre de grumes plus courtes dans les charpentes dès les XVI^e^-XVII^e^ siècles (fig. 12). Ainsi, en 1627, dans son « théâtre de l'art de charpentier », Mathurin Jousse cite naturellement l'emploi d'agrafe, de barres, d'étriers ou de chevilles de fer, notamment pour « supporter par le milieu » entraits, liernes et tirants (Jousse, 1627). Le rôle du fer en charpente a donc évolué. Etant d'abord employé comme renfort de précaution, il devient, aux Temps modernes, un support, c'est-à-dire un élément actif dans la confection du comble.

En résumé, entre le XII^e^ et le XVIII^e^ siècles, la situation change. Alors qu'au XIII^e^ siècle, c'est l'avènement d'un style nouveau, l'« architecture gothique », accompagné de la diminution de la consommation en bois dans les charpentes qui semblent influencer de début de l'emploi du fer en charpenterie, au XVI^e^ siècle, ce sont des contraintes économique et technique qui auraient engendré la réduction de la consommation de bois en partie au moins compensée par le développement régulier d'une utilisation du renfort en fer toujours plus diversifiée et importante.

Quid des évolutions techniques ?

Les variations des modalités de construction semblent principalement influencées par des composantes esthétiques et économiques, mais il est tout aussi légitime de s'interroger sur le rôle joué par l'influence des changements techniques.

Qu'en est-il de l'incidence de l'arrivée de production issue de la filière indirecte sur l'utilisation du fer dans les charpentes ? Le témoin le plus ancien de l'utilisation du procédé indirect de réduction du minerai de fer dans le bassin Mosan est un renfort de charpente daté du premier tiers du XIV^e^ siècle. Or, l'utilisation du fer dans les charpentes de comble apparaît et se généralise rapidement à partir du XIII^e^ siècle, époque à laquelle seul le procédé de réduction directe est avéré. L'utilisation du fer dans les combles semble donc davantage liée aux précautions d'usage appliquées au début du développement de l'« architecture gothique » qu'à la mise en place d'une nouvelle technique de réduction qui aurait rendu le fer plus disponible ou moins onéreux (Cantelaube et Verna, 2002). Plus avant, entre le XIV^e^ et le XVI^e^ siècles, l'utilisation du fer augmente constamment dans les charpentes sans cependant que l'on ne puisse faire de lien avec l'apparition de la réduction indirecte. D'ailleurs, il faut noter que jusqu'au début XV^e^ siècle le procédé direct de réduction semble rester largement majoritaire dans les volumes de production utilisés dans les combles.

L'Héritier fait la même constatation concernant le fer employé en maçonnerie dans les églises de Bourgogne, de Champagne[12] et de Haute-Normandie. Le procédé de réduction direct reste ici majoritairement employé jusqu'à la fin du XV^e^ siècle et subsiste durant une bonne partie du XVI^e^ siècle (L'Héritier, 2010). En outre, constatant que le vitrail est le premier consommateur de fer dans les cathédrales gothiques de Troyes et de Rouen, L'Héritier a examiné l'évolution du rapport entre la masse de fer et le volume de verre entre le XII^e^ et le XV^e^ siècles (L'Héritier, 2007). Ainsi, il constate que la masse de fer utilisée dans un vitrail dépend directement des dimensions de celui-ci et que ces dimensions augmentent de façon générale dès le début du XIII^e^ siècle. Deuxièmement, il montre que le rapport entre la surface vitrée et la masse de fer diminue lorsque la taille des baies vitrées augmente et que se multiplient les remplages en pierre. Troisièmement, il établit que les fers antérieurs à l'extrême fin du XV^e^ siècle sont majoritairement issus de production directe (L'Héritier *et al.*, 2010). Ainsi, ici aussi, il apparaît que l'utilisation de plus en plus massive du fer dans l'architecture à la fin du Moyen Âge et au début de l'Époque moderne semble le fruit d'une longue évolution influencée plus par les modifications des styles et des méthodes de construction que par l'introduction de nouveaux modes de production du matériau.

Dans l'avenir, de nouvelles analyses archéométallurgiques sont à conduire pour différencier les modes de production des fers utilisés dans les charpentes et mieux évaluer l'apparition de la métallurgie du fer indirecte dans le premier tiers du XIV^e^ siècle et l'impact de son développement entre le XV^e^ et le XVIII^e^ siècles. Notons dès à présent qu'il est avéré que la métallurgie du fer indirecte connaît durant les XVI^e^, XVII^e^ et XVIII^e^ siècles une phase d'expansion en Ardennes (Évrard, 1956 ; Pirotte, 1966 ; Gillard, 1971 ; Hansotte, 1968 ; Hansotte, 1972 ; Pasquasy, 2005 ; Awty, 2007). Il faudra alors mesurer si ce phénomène de généralisation et de développement est à corréler avec l'utilisation plus importante du fer démontrée dans les charpentes de comble à partir du XVIII^e^ siècle (fig. 6 et 7).

6. Conclusion

Il ressort de ces travaux que l'utilisation du fer est importante dans les charpentes médiévales et modernes du bassin

12. Il s'agit de contextes comparables notamment en ce qui concerne la Champagne où la mention la plus ancienne de l'utilisation d'un haut fourneau et du procédé indirect remonte à 1377 (Rouillard, 2003).

© Presses universitaires de Rennes

de la Meuse et que l'usage de ces renforts augmente à mesure que la quantité de bois mise en œuvre diminue. Plus encore, la combinaison des informations dendrochronologiques, architecturales et archéométallurgiques, tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif, a permis d'appréhender l'évolution de l'emploi du fer et des techniques de charpenterie en plusieurs étapes en rapport avec l'histoire de l'architecture, l'histoire des techniques et l'histoire économique.

Effectivement, l'étude tend à démontrer que dans la région mosane, les premières pièces en fer apparaissent dans les charpentes avec l'avènement de l'« architecture gothique » pour renforcer les assemblages sans qu'il n'y ait de lien avec le développement de la réduction indirecte, mais plutôt pour répondre à un sentiment de précaution, alors qu'augmentent les dimensions des combles et l'inclinaison des pentes des toits. Les analyses chimiques inclusionnaires ont en effet révélé que l'utilisation de fer issu du procédé indirect de réduction apparaît dans le premier tiers du XIV^e^ siècle, mais reste largement minoritaire au moins jusqu'au premier tiers du XV^e^ siècle. Ainsi, si cette datation est la plus précoce attestation en Wallonie de l'utilisation de fer produit en indirect, elle montre aussi que le développement de cette technique en Occident connaît une expansion longue et progressive au moins depuis le XII^e^ siècle en Suède jusqu'à son épanouissement durant l'Epoque moderne spécialement en Ardennes (Magnusson, 1994 ; Awty, 2007). La lente mise en place de cette technique en Wallonie au cours du XV^e^ siècle pourrait aussi être due, au moins en partie, aux importants conflits qui agitent toute la région à cette époque entre les ducs de Bourgogne et le roi de France. Entre le XVI^e^ et le XVIII^e^ siècles, ensuite, si les techniques de construction des charpentes évoluent peu, il apparaît que la diminution des ressources forestières engendre l'utilisation de bois de plus grande circonférence et de plus courte longueur travaillés à la scie et entraine de ce fait une évolution des typologies de charpentes de comble dans lesquelles l'utilisation du fer continue à prendre une place toujours plus importante.

On retiendra alors que les innovations notamment sidérurgiques sont des processus à appréhender sur la longue durée en maniant dans le même temps les concepts de diffusion, d'acceptation, d'assimilation voir d'adaptation et de développement, comme cela a d'ailleurs déjà été observé dans des régions plus méridionales (Cantelaube et Verna, 2002).

Remerciements

Nous tenons à remercier le service DGO4 de la Région Wallonne, ainsi que les fabriques d'églises pour nous avoir autorisé les études et les prélèvements analytiques et permis d'accéder aux combles. Nous souhaitons également remercier François Mathis et l'ensemble de l'équipe du Centre Européen d'Archéométrie de l'Université de Liège qui ont soutenu et participé à ce travail. Enfin, nous remercions Philippe Dillmann (IRAMAT LMC CNRS UMR5060) et Maxime L'Héritier (SIS2M LAPA CEA/CNRS UMR3299) de nous avoir permis d'utiliser l'abaque discriminant des procédés de réduction et, plus largement, pour avoir collaboré à la réflexion.

Bibliographie

Awty, B. G., 2007 – The Development and Dissemination of the Walloon Method of Ironworking. *Technology and Culture*, 48, (4), p. 783-803.

Aumard, S., Dillmann, Ph., L'Héritier, M., 2011 – Le métal selon l'archéologue et l'archéomètre, dans Ch. Sapin (dir.). *Saint-Etienne d'Auxerre. La seconde vie d'une cathédrale*, Auxerre, Picard.

Belhoste, J.-F., 1996 – Fabrication et mise en œuvre du fer dans la construction – Grandes étapes d'évolution (XII^e^-XIX^e^ siècles). *Monumental*, 13, p. 9-17.

Benoît, P., 1985 – Métal et construction en France au Moyen Âge, dans O. Chapelot, P. Benoît (dir.), *Pierre et métal dans le bâtiment au Moyen-âge*. EHESS, réimpression 2001, Paris, p. 359-367.

Bernard, V., Epaud, F., Le Digol, Y., 2007 – Le bois : de la forêt au chantier, dans F. Epaud. *De la charpente romane à la charpente gothique en Normandie. Evolution des techniques et des structures de charpentiers aux xii*e*-xiii*e *siècles*. Publications du CRAHM, Paris, p. 9-46.

Bernardi, Ph., Dillmann, Ph., 2002 – La place du métal dans la construction, dans D. Vingtain (dir.). *Monument de l'Histoire – Construire, reconstruire le Palais des Papes, XIV^e^-XIX^e^ siècles*. RMG – Palais des Papes (Ed.), Avignon, p. 63-67.

Cantelaube, J., Verna, C., 2002 – Les forges à la génoise dans les Pyrénées centrales au XVI^e^ siècle : quel transfert d'innovation ?, dans C. C. Tizzoni, M. Tizzoni (dir.). *Actes du colloque Iron in the Alpes. Deposits, mines and metallurgy from antiquity to the XVI century*, Comune di Bienno (Ed.), Breno, p. 152-163.

Dillmann, P., L'Héritier, M., 2007 – Slag inclusion analyses for studding ferrous alloys employed in French medieval building: supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science*, 34 (11), p. 1810-1823.

J. de Vries, D., 2003 – The appearance of trusses in the Low Countries', dans *S. Huerta (dir.), Proceedings of the First International Congress on Construction History (Madrid, 2003)*, Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura (Ed.), Madrid, Vol. III, p. 2097-2105.

© Presses universitaires de Rennes

Eissing, Th., 2009 – *Kirchendächer in Thüringen und dem südlichen Sachsen-Anhalt. Dendrochronologie, Flösserei, Konstruktion. Arbeitsheft des Thüringisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie*, 32. Volume 1, Erfurt.

Epaud, F., 2007 – *De la charpente romane à la charpente gothique en Normandie. Evolution des techniques et des structures de charpentiers aux xiie-xiiie siècles*. Publications du CRAHM, Paris.

Erlande-Brandenburg, A., 1996 – L'architecture rayonnante et le métal. *Dossier d'archéologie*, 219, p. 46-53.

Évrard, R., 1956 – *Forges anciennes*. Editions Solédi (Ed.), Liège.

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

Fischer-Kohnert, B., 1999 – *Das mittelalterliche Dach als Quelle zur Bau- und Kunstgeschichte : Diminikanerkirche, Minoritenkirche*, Dom, Rathaus und Alte Kapelle in Regensburg. Imhof, Petersberg.

Fluzin, P., 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*, 57, p. 101-121.

Gillard, A., 1971 – *L'industrie du fer dans les localités du comté de Namur et de l'Entre-Sambre-et-Meuse de 1345 à 1600*, Bruxelles, Pro Civitate.

Hansotte, G., 1968 – La métallurgie dans les bassins de l'Amblève et l'Ourthe stavelotaine et limbourgeoise 1393-1846. *Folklore Stavelot-Malmédy Saint-Vith*, 32, p. 99-128.

Hansotte, G., 1972. La métallurgie wallonne au xvie et dans la première moitié du xviie siècle. Essai de synthèse, *Bulletin de l'Institut archéologique liégeois*, 84, p. 21-42.

Hoffsummer, P., 1989 – L'évolution des toits à deux versants dans le bassin mosan : l'apport de la dendrochronologie (xie-xixe siècle). Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique.

Hoffsummer, P., 1995 – *Les charpentes de toitures en Wallonnie*. *Monuments et Sites*, 1. Etudes et Documents, Namur.

Hoffsummer, P., 1999 – Les charpentes. *In* A. Dierkens (dir.). *L'ancienne église abbatiale de Saint-Hubert. Monuments et Sites*, 7. Etudes et Documents, Namur, p. 90-95.

Hoffsummer, P., 2002 – *Les charpentes du xie au xixe siècle : typologie et évolution en France du Nord et en Belgique*, Paris.

Hunot, J.-Y., 2001 – *L'évolution de la charpente de comble en Anjou, du xiie au xviiie siècle*, Angers.

Jousse, M., 1627 – *Le théâtre de l'art de charpentier, enrichi de diverses figures, avec l'interprétation d'icelles*, La Flèche.

La Hire, G.-P. de, 1702 – *L'art de charpenterie de Mathurin Jousse. Corrigé et augmenté de ce qu'il y a de plus curieux dans cet art et des machines les plus nécessaires à un charpentier*, Paris.

L'Héritier, M., 2007 – *L'utilisation du fer dans l'architecture gothique : les cas de Troyes et Rouen*. Thèse de doctorat, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, France.

L'héritier, M., 2009 – L'emploi du fer dans la construction gothique : présentation de la méthodologie. Les exemples des cathédrales de Troyes et de Rouen, dans A. Timbert (Ed.). *Actes du colloque de Noyon des 16 et 17 novembre 2006*. Picard, Paris, p. 61-73.

L'Héritier, M., Dillmann, Ph., Benoît, P., 2010 – Iron in the building of gothic churches: its role, origins and production using evidence from Rouen and Troyes. *Historical Metallurgy*, 44, (1), p. 21-35.

Mangin, M. (dir.), 2004 – *Le fer*, Paris, Errance.

Maquet, J. (dir.), 2005 – *Le patrimoine médiéval de Wallonie*, Namur.

Magnusson, G., 1994 – Les mines et les bœufs ou la plus ancienne industrialisation de la Suède. *In* M. Mangin (dir.). *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen. Archéologie et archéométrie*, colloque de Besançon (Besançon, 1993), Paris, Les Belles Lettres.

Mertens, A., Mathis, F., Dillmann, Ph., Hoffsummer, P., 2009 – Emergence du procédé indirect d'élaboration du fer en région liégeoise : apport d'une étude technique de fers de charpentes datées par dendrochronologie, *Chimie nouv*elle, 101, p. 24-28.

Pagès, G., Dillmann, P., Fluzin, P., Long, L., 2011 – A study of the roman half-products of Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône, France). A proposal for a comprehensive metallographic approach. *Journal of Archaeological Science*, 38, (6), p. 1234-1252.

Pagès, G., Fluzin, F., Long, L., 2011 – L'acier, une variété de fer parmi d'autres ? Approches méthodologiques des demi-produits des épaves romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône, France), dans P. Dillmann, L. Hilaire-Perez, C. Verna (dir.). *Actes du colloque L'acier en Europe avant Bessemer* (Paris, 2005) , Toulouse, Méridiennes-FRAMESPA-CNRS/Université de Toulouse.

Pasquasy, F., 2005 – Le haut fourneau au pays de Liège, *Bulletin de la Société des Bibliophiles liégeois*, XXV, p. 185-237.

Pirotte, F., 1966 – L'industrie métallurgique de la terre de Durbuy de 1480 à 1625. Ses rapports avec la métallurgie liégeoise, *Bulletin de l'Institut archéologique liégeois*, 79, p. 145-209.

Rouillard, J., 2003 – *L'homme et la rivière : histoire du bassin de la Vanne au Moyen Âge (xiie-xvie siècles)*, thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 401 p.

Stroobants, A., 1985. Le fer forgé dans l'architecture à Gand, Bruges et Anvers à la fin du Moyen Âge, dans O. Chapelot, P. Benoît (dir.). *Pierre et métal dans le bâtiment au Moyen-âge*. Paris, p. 273-291.

Suttor, M., 1999 – Prospection, commerce et transport. Du Bassin mosan aux Pays-Bas. xiiie-xviie siècle. *In* A. Corvol (éd.). *Forêt et marine*. L'Harmattan, Paris, p. 163-172.

© Presses universitaires de Rennes

Suttor, M., 2006. *Vie et dynamique d'un fleuve : la Meuse de Sedan à Maastricht (des origines à 1600)*. Bruxelles.

Tampone, G., 2002 – Collegamenti. Degradazione e restauro, dans G. Tampone, M. Mannucci, N. Macchioni (dir.). *Strutture di legno. Cultura, conservazione, restauro*, De lettera editore, Milan, p. 62-73.

Taupin, J.-L., 1996 – Le fer dans les cathédrales. *Monumental*, 13, p. 18-27.

Texier, A., Dillmann, Ph., L'Héritier, M., Timbert, A., Welter, J.-M., 2007. Le métal dans l'architecture. *Monumental*, p. 90-112.

Timbert, A. (dir.), 2009 – *L'homme et la matière. L'emploi du plomb et du fer dans l'architecture gothique : actes du colloque de Noyon des 16 et 17 novembre 2006*, Paris.

Wilcox, R. P., 1981 – *Timber and iron reinforcement in early buildings*, Londres.

Williams, M., 2000 – Dark ages and dark areas: global deforestation in the deep past. *Journal of Historical Geography*, 26, 1 (2000), p. 28-46.

Yante, J. M., 1985 – Provenance, acheminement et mise en œuvre du fer dans le bâtiment : le cas du Pays mosan XIV^{e}-XVI^{e} siècles, dans O. Chapelot, P. Benoît (dir.), *Pierre et métal dans le bâtiment au Moyen-âge*, Paris, p. 293-303.

© Presses universitaires de Rennes