



**ArcheoSciences**  
Revue d'archéométrie

29 | 2005  
Varia

---

## Utilisation des alliages ferreux dans la construction monumentale du Moyen Age. Etat des lieux de l'avancée des études métallographiques et archéométriques

Maxime L'Héritier, Amélie Juhin, Philippe Dillmann, Régis Aranda et Paul Benoit

---



### Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/594>  
DOI : 10.4000/archeosciences.594  
ISBN : 978-2-7535-1594-9  
ISSN : 2104-3728

### Éditeur

Presses universitaires de Rennes

### Édition imprimée

Date de publication : 31 décembre 2005  
Pagination : 117-132  
ISSN : 1960-1360

### Référence électronique

Maxime L'Héritier, Amélie Juhin, Philippe Dillmann, Régis Aranda et Paul Benoit, « Utilisation des alliages ferreux dans la construction monumentale du Moyen Age. Etat des lieux de l'avancée des études métallographiques et archéométriques », *ArcheoSciences* [En ligne], 29 | 2005, mis en ligne le 31 décembre 2007, consulté le 19 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/594> ; DOI : 10.4000/archeosciences.594

---

# Utilisation des alliages ferreux dans la construction monumentale du Moyen Age. État des lieux de l'avancée des études métallographiques et archéométriques

Maxime L'HERITIER<sup>1</sup>, Amélie JUHIN<sup>2</sup>, Philippe DILLMANN<sup>3</sup>, Régis ARANDA<sup>4</sup> et Paul BENOIT<sup>5</sup>

**Résumé :** L'étude métallographique des fers de construction mis en œuvre dans certains grands édifices français des périodes médiévales et modernes apporte de nombreuses informations sur les caractéristiques du matériau utilisé tout comme sur l'histoire de la métallurgie du fer, en même temps qu'elle soulève de nombreuses interrogations. Les résultats accumulés depuis quelques années permettent de mettre en valeur différents points. Tout d'abord, il semble que les grands édifices médiévaux sont pour la plupart renforcés uniquement avec du fer de réduction directe. En région rouennaise, la période de transition identifiée par analyse des inclusions se situe à la fin du XV<sup>e</sup> siècle, ce qui correspond à l'étude archivistique. Le fer employé, rempli d'inclusions, souvent phosphoreux, et n'ayant pas fait l'objet de traitement spécifique est un matériau standard pour la période médiévale ; de rares exceptions sont cependant à noter. Sont également évoquées les questions relatives aux différentes étapes du travail de forge, et en premier lieu celle de l'utilisation du marteau hydraulique pour faciliter la phase d'épuration de la loupe, opération longue et épuisante d'après les résultats d'archéologie expérimentale. Pour finir, la fréquente homogénéité de certains rapports dans les inclusions semble montrer que les hétérogénéités de la matrice, notamment la diversité des degrés de carburation, sont liées à l'hétérogénéité initiale de la loupe de fer, et non la marque d'une récupération par corroyage.

**Abstract:** The metallographic study of construction iron used in churches and other buildings during the Middle Ages and the modern period can provide a great deal of information on the characteristics of this material as well as on the history of iron and steel metalworking. At the same time the study of construction iron raises many questions. This paper discusses results accumulated from certain French monuments, these include: the cathedrals of Amiens and Rouen, the church Saint-Ouen of Rouen, the basilica of Saint-Denis, the Palais des Papes in Avignon and the dungeon of the Château de Vincennes.

The analysis of the composition of slag inclusions entrapped in the metallic matrix allows differentiating iron of the direct process from iron that comes from finery. It seems that all these medieval buildings were essentially reinforced with bars of bloomery iron, and thus didn't really take advantage of the introduction of the blast furnace. In Normandy, where several buildings were studied, the results are compatible with that of the archives: a transition between the direct and indirect processes during the end of the 15<sup>th</sup> century.

The metallographic analyses show that in general the iron used in those monuments is very heterogeneous, with no peculiar distribution of the iron and steel parts, numerous slag inclusions, and often a high content of phosphorus. Moreover, no specific forge treatment was observed. This material seems to be a random quality iron for these periods, but whose quality was always fairly sufficient according to its section and role. Certain bars of the Palais des Papes are the only exception to this picture so far.

Questions related to the different stages of the smith's work at the forge are then evoked.

Results from forge experiments, specifically on the cleansing operation that occurs between the reduction and the forming of the object, have been studied. Two phases have been identified in this stage: first compacting the bloom with a wooden hammer to reduce its porosity, second expelling the slag inclusions that are still entrapped in the metal by folding the piece of metal and hammering it with a steel hammer. The experiment shows that this phase is particularly long and tiring: more than 4 hours to get an ingot out of a 14 kg bloom. Therefore it brings out the question of the use of hydraulic hammers to help the smith in the second phase of the cleansing.

Finally, the analysis of the composition of the slag inclusions reveals that, in more than one case out of two, the ratios of certain elements (Al, Si, Ca) are stable in the whole sample. These elements are a sort of chemical signature of the object resulting from the reduction. Therefore, it seems that all the heterogeneities seen above are more likely to be linked to the original heterogeneity of the bloom and not the mark of recuperation by welding pieces of metal from different origins. Therefore brand new metal seems to take an important place in the supply of these monumental buildings. It is also sometimes possible to determine, through the slag inclusion analysis, that sand additions were made during the forging phase.

**Mots-clés :** Analyses métallographiques, construction, églises, inclusions, filière directe, filière indirecte, fer phosphoreux, épuration.

**Key-words:** Metallographic analyses, construction, churches, slag inclusions, direct process, indirect process, phosphorous iron, cleansing.

<sup>1</sup> Laboratoire de Médiévisstique Occidentale de Paris UMR 8589, Equipe d'Histoire des Mines et de la Métallurgie, 9 rue Mahler, 75004 PARIS, France et UMR 9956, Laboratoire Pierre Süe CEA-CNRS, CEA Saclay, 91191 GIF-SUR-YVETTE Cedex, France. maxlher@noos.fr

<sup>2</sup> Laboratoire Pierre Süe CEA-CNRS, CEA Saclay, 91191 GIF-SUR-YVETTE Cedex, France. ameliejuhin@yahoo.com

<sup>3</sup> Laboratoire Métallurgies et Cultures UMR 5060, IRAMAT, Belfort et UMR 9956 Laboratoire Pierre Süe, CEA-CNRS, CEA, Saclay, 91191 GIF-SUR-YVETTE Cedex, France. dillmann@cea.fr

<sup>4</sup> Laboratoire Métallurgies et Cultures UMR 5060, IRAMAT, BELFORT.

<sup>5</sup> Laboratoire de Médiévisstique Occidentale de Paris UMR 8589, Equipe d'Histoire des Mines et de la Métallurgie, 9 rue Mahler, 75004 PARIS, France. cdaubas@univ-paris1.fr

## Introduction

Depuis quelques années, la question de l'utilisation du fer dans l'architecture médiévale et moderne prend un nouvel essor avec une multiplication des études, et notamment des analyses métallographiques. La perception des fers de construction a bien évolué depuis les premières analyses réalisées à Beauvais dans les années 1990 (Robin et TERNON, 1994 ; Taupin, 1996). Le Palais des Papes d'Avignon, les cathédrales de Reims, de Coutances, d'Amiens et Rouen, les églises Saint-Ouen et Saint-Maclou de Rouen, l'église Saint-Gervais-Saint-Prottais de Paris, le donjon du château de Vincennes, ou encore la basilique de Saint-Denis sont autant de monuments qui, à plus ou moins grande échelle, ont fait l'objet d'études métallographiques<sup>1</sup>. Aux techniques de métallographie classiques, attaque Nital de la matrice métallique et observations macroscopiques et microscopiques, ont été adjoints des moyens d'analyse plus complets : dosage systématique des inclusions au Microscope Électronique à Balayage en Spectrométrie EDS, et établissement des variations de la teneur en phosphore de la matrice par attaque au réactif Oberhoffer et dosage à la microsonde de Castaing en Spectrométrie WDS.

Les techniques qui ont été développées et les résultats en découlant permettent d'approcher avec une plus grande précision les caractéristiques des fers de construction médiévaux et modernes. Les différentes perspectives qu'offrent les analyses métallographiques à la connaissance de ce matériau seront évoquées dans cet article avec un bilan de la recherche en cours. Il ne s'agit donc pas ici de faire un exposé exhaustif des résultats obtenus sur chacun des spécimens analysés, certains d'entre eux ayant par ailleurs déjà fait l'objet de publications comme le Palais des Papes d'Avignon (Dillmann et Bernardi, 2003 ; Dillmann *et al.*, 2003) ou la cathédrale de Rouen

(L'Héritier, 2003 ; L'Héritier *et al.*, 2005), mais plutôt de mettre l'accent sur certaines caractéristiques de ces fers de construction et sur plusieurs axes de recherche qui nous semblent essentiels dans cette approche.

C'est ainsi que seront discutées successivement les questions de la perception de l'évolution des procédés de réduction à la fin du Moyen Age, de la qualité du matériau employé, de la récupération du métal, ainsi que de la quantité de travail nécessaire au forgeron pour réaliser ces objets, questions qui sont au cœur des problématiques animant cette recherche sur l'utilisation du fer dans l'architecture au Moyen Age et à l'époque moderne. Le but est donc de poser un jalon méthodologique pour l'orientation des recherches futures.

## Corpus

Le corpus étudié réunit une dizaine de bâtiments des périodes médiévales et modernes. Le nombre d'objets étudiés par bâtiment est très variable, allant de l'analyse d'un seul élément, déposé lors d'une restauration par exemple, à l'étude complète d'un ensemble d'objets choisis pour l'étude et prélevés en place sur le bâtiment (voir tab. 1).

Les sections prélevées et analysées sont toujours tributaires du type d'objet considéré. Ceux qui étaient déposés ou brisés ont pu faire l'objet d'analyses sur de larges sections longitudinales ou transversales, alors que les tirants encore en place dans ces bâtiments n'ont pu faire l'objet que de prélèvements d'esquilles millimétriques ne risquant pas de mettre en péril la statique de l'édifice.

## Mode opératoire

Tous les spécimens ont été soumis au même protocole de préparation. Après découpage de la zone sélectionnée,

Edifice	Datations	Nombre d'objets analysés
cathédrale de Rouen	fin XII <sup>e</sup> – début XVI <sup>e</sup> s.	11
église Saint-Ouen de Rouen	1318 – mi XVI <sup>e</sup> s.	24
église Saint-Maclou de Rouen	vers 1436 – début XVI <sup>e</sup> s.	1
cathédrale d'Amiens	1220 – fin XV <sup>e</sup> s.	1
cathédrale de Reims	1211 – début XVI <sup>e</sup> s.	1
donjon du château de Vincennes	1336 – 1370	8
cathédrale de Coutances	XIII <sup>e</sup> – XIV <sup>e</sup> s.	1
basilique de Saint-Denis	XII <sup>e</sup> – mi XIII <sup>e</sup> s.	1
Palais des Papes d'Avignon	XIV <sup>e</sup> s.	8
église Saint-Gervais-Saint-Prottais de Paris	XVII <sup>e</sup> s.	4

Tableau 1 : Datation des édifices étudiés et nombre d'objets analysés par édifice.  
Table 1: Dates of the studied monuments and number of objects analysed per monument.

<sup>1</sup> L'étude sur l'église Saint-Ouen a été financée par le Ministère de la Culture et de la Communication, Direction Régionale des Affaires Culturelles de la Seine-Maritime. Les résultats sont disponibles dans L'Héritier, 2005.

celle-ci est enrobée à froid sous résine, puis la surface à examiner fait l'objet d'un dégrossissage et prépolissage aux papiers de SiC, grades 80 à 4000. Le polissage final se fait à la pâte diamantée, 3 et 1  $\mu\text{m}$ .

Un premier repérage est fait au microscope optique par réflexion, afin d'évaluer la propreté inclusionnaire et de détecter d'éventuelles lignes de soudure. Pour tenter de sortir des caractérisations assez subjectives de la propreté inclusionnaire pour les objets archéologiques, nous avons mis en œuvre une norme descriptive qui s'appuie sur la norme AFNOR NF A04-106, corrigée d'un facteur 10, ce qui permet de garder les mêmes images types données par cette dernière<sup>2</sup>. Le protocole appliqué est le suivant. L'objet, une fois poli, est observé à la loupe binoculaire. Des photographies de toute la surface sont réalisées de telle manière que la surface de chaque photographie soit un cercle de diamètre 8 mm<sup>3</sup>. Ces images sont ensuite agrandies d'un facteur 10 et comparées aux images types de la norme AFNOR de même diamètre, soit 8 cm. A chaque image est affecté un numéro de 1 à 5 suivant la

quantité et la taille des inclusions, auquel est ajouté une étoile (\*) pour ne pas confondre la norme AFNOR et sa modification<sup>4</sup> (voir fig. 1). Les inclusions sortant du cadre de la norme sont notées à part. Les résultats peuvent ensuite être présentés sous forme d'histogramme et de moyenne. Si l'objet possède une excellente propreté inclusionnaire (1\* en moyenne), il se prête alors à une étude selon la norme AFNOR sans modification.

Ensuite, l'attaque au réactif Nital 4 %, permet de révéler la structure métallographique, avec observations macroscopiques et au microscope optique. Les sections sont ensuite repolies pour observation des inclusions au Microscope Electronique à Balayage (MEB) et dosage de leur composition par Spectrométrie X Dispersive en Energie (EDS). Le détecteur Si(Li) utilisé est équipé d'une fenêtre mince qui permet la quantification de la teneur en oxygène avec une bonne précision (1 % sur un échantillon standard de magnétite – Tension d'accélération des électrons : 15 kV). La limite de détection est de l'ordre de 0,5 %<sub>mass</sub> pour la détection EDS des éléments

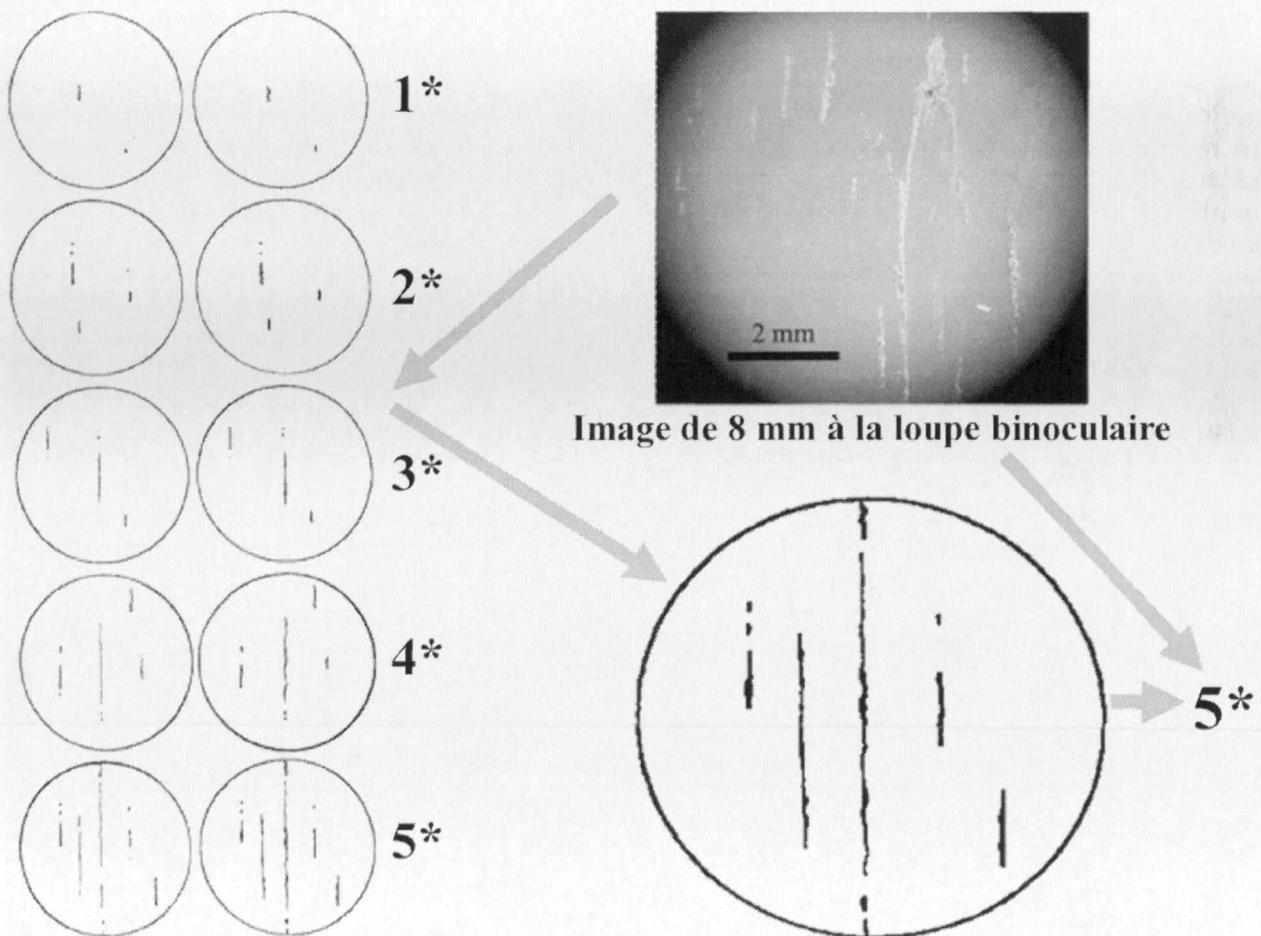


Figure 1 : Modification de la norme AFNOR NF A04-106 et exemple d'application.

Figure 1: Modification of the AFNOR norm NF A04-106 and an example of its application. This modification was made in order to be able to determine the slag inclusion cleanliness of a sample with a quantitative description.

<sup>2</sup> Il n'est en effet pas possible de juger de cette propreté inclusionnaire selon des critères de métallurgie contemporaine : actuellement, les quantités et les tailles des inclusions sont bien inférieures à celles rencontrées dans les fers avant l'apparition des procédés d'élaboration en phase liquide (Bessemer, Thomas – deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle).

<sup>3</sup> Dans la norme AFNOR, il s'agit initialement d'un cercle de diamètre 0,8 mm.

<sup>4</sup> Nous n'avons pas utilisé les séries « fines » et « épaisses » de la norme AFNOR, correspondant à l'épaisseur des inclusions, qui apparaissaient trop peu représentatives.

de numéro atomique supérieur au magnésium et l'incertitude relative de 1 %.

Afin d'appréhender une éventuelle variation de la composition des inclusions due à l'utilisation de lopins d'origine différente, toutes les inclusions de la section sur une bande de 500 µm de large, perpendiculaire au sens de martelage, sont dosées de manière systématique. Si moins de 30 inclusions ont été analysées, une seconde traversée est réalisée.

Les éléments mineurs de la matrice métallique, et en particulier le phosphore, sont dosés en Spectrométrie X Dispersive en Longueur d'Onde (WDS) à la microsonde de Castaing au laboratoire CAMPARIS de l'Université Paris VI Pierre et Marie Curie. La limite de détection se situe aux alentours de 150 ppm pour l'élément P dans une matrice ferritique, et l'incertitude absolue est de 40 ppm. La répartition quantitative du phosphore dans la matrice est également mise en évidence par attaque au réactif cuivrique de Oberhoffer.

## Résultats

### L'évolution des procédés de réduction

Les fers de construction, souvent bien datés, constituent un très bon champ d'étude pour étudier l'évolution des procédés de réduction du minerai de fer et leur diffusion. Ce travail se base sur la caractérisation de ces filières par l'intermédiaire de l'analyse de la composition élémentaire des inclusions non métalliques et la recherche d'inclusions discriminantes (Dillmann *et al.*, 2002).

Rappelons qu'il existe deux filières techniques anciennes de production de fer : les filières directe et indirecte<sup>5</sup>. En Europe, jusqu'au XV<sup>e</sup> siècle, la «réduction» du minerai de fer se fait essentiellement selon la filière directe. L'utilisation de l'énergie hydraulique appliquée à la métallur-

gie du fer dès le XII<sup>e</sup> siècle va entraîner d'importantes évolutions dans ce domaine ainsi que dans l'économie médiévale. La ventilation fournie par la force hydraulique permet d'atteindre des températures beaucoup plus élevées, supérieures à 1600°C, et de passer ainsi à la filière dite indirecte. Des études récentes tendent à montrer que les régions d'Europe du Nord et du Nord-Ouest ont abrité de nombreux foyers où ce type de métallurgie s'est mis en place de manière très précoce<sup>6</sup>. De manière plus générale, il est de nos jours admis que les deux filières coexistent en Europe au cours d'une période comprise entre la fin du XIV<sup>e</sup> et le XVI<sup>e</sup> siècle (Benoit, 1993). Au cours du XVI<sup>e</sup> siècle, la filière indirecte supplante presque complètement la filière directe.

Les inclusions non métalliques piégées dans le métal sont des témoins de la filière technique employée. Pour la filière directe, elles proviennent des composés non réduits du minerai et ont des compositions relativement proches de ce qui peut être observé dans les scories de réduction. En revanche, pour la filière indirecte, la plupart d'entre elles proviennent d'une formation endogène dans la fonte lors de l'affinage. C'est la raison pour laquelle l'étude de la composition des inclusions permet dans certains cas favorables de discriminer le type de procédé dont sont issus les objets archéologiques. Des études archéométriques ont en effet permis de mettre en évidence certains facteurs caractéristiques de chacun des deux types de réduction (Dillmann, 1998 ; Dillmann *et al.*, 2002).

Dans les fers de filière directe, dans des zones très carburées, certaines inclusions vitreuses sont à forte teneur en aluminium (de l'ordre de 10 %<sub>mass</sub>), silicium et faible teneur en fer (< 10 %<sub>mass</sub>), avec un rapport Si/Al compatible avec celui des autres inclusions (voir fig. 2a). Ceci s'explique par le fait qu'en bas fourneau, où les conditions thermodynamiques et cinétiques sont hétérogènes, certaines zones peuvent être à haute température et à

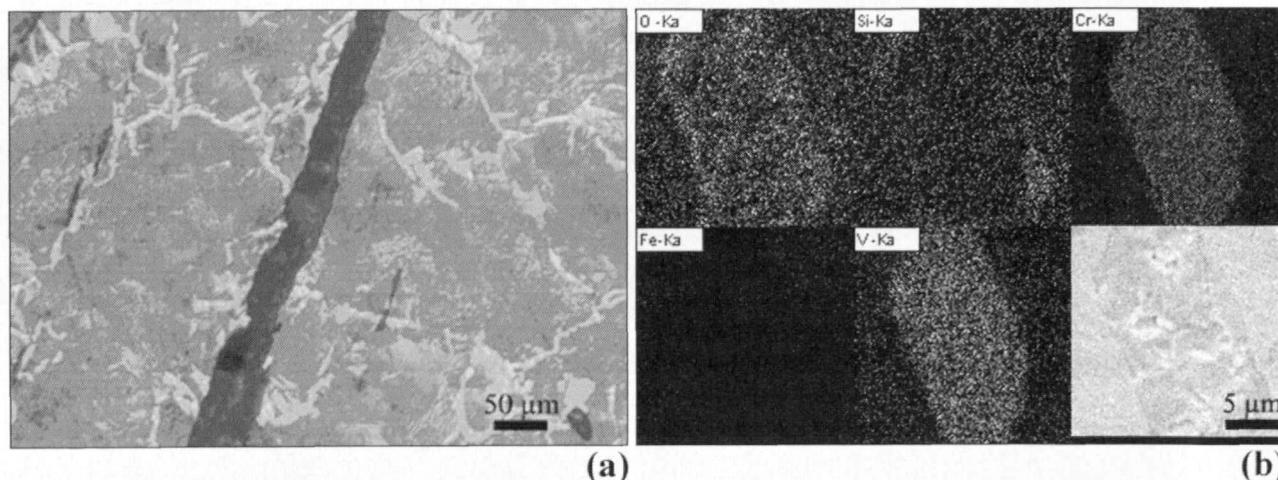


Figure 2 : (a) Inclusion vitreuse dans une matrice carburée, spécimen OUE09a, attaque Nital ; (b) Cartographie élémentaire EDS montrant une phase d'oxyde de chrome et de vanadium dans une inclusion, spécimen OUE24a.

Figure 2: (a) Glassy slag inclusion in a carburized matrix, sample OUE09a, Nital etching. Such slag inclusions are characteristic of bloomery process iron; (b) Angular phase of vanadium oxide in a slag inclusion of sample OUE24a, EDS elementary mapping. Such phase in a slag inclusion is characteristic of iron obtained by finery.

<sup>5</sup> Pour de plus amples détails sur les caractéristiques de la filière directe ou de la filière indirecte, voir par exemple L'Heritier *et al.*, 2003.

<sup>6</sup> Knau a identifié l'utilisation du procédé indirect en Allemagne, dans la vallée de la Volme au XIII<sup>e</sup> siècle (Knau *et al.*, 1996). Le haut fourneau du Lapphyttan (Suède) est également daté du XIV<sup>e</sup> siècle (Magnusson, 1985).

relativement forte pression partielle de monoxyde de carbone, provoquant une réduction poussée des oxydes de fer et une diffusion du carbone dans le métal. Les températures nécessaires à la réduction des oxydes de silicium et d'aluminium ne sont cependant pas atteintes. Ce serait à ces endroits que les inclusions vitreuses à faible teneur en fer et fortes teneurs en silicium et aluminium se formeraient. Ceci a été vérifié par l'observation sur des loupes provenant de reconstitution de réduction en bas fourneau (procédé biscaïen) en archéologie expérimentale (Dillmann *et al.*, 2002 ; Fluzin *et al.*, 2002). En revanche, en filière indirecte, il n'a jamais été identifié de telles inclusions en zone carburée lors de ces études (Dillmann, 1998 ; Dillmann *et al.*, 2002). Enfin, ces inclusions ne peuvent être confondues avec d'éventuels ajouts siliceux lors de soudures, car ceux-ci se trouvent plutôt en zone décarburée et n'ont pas de rapport Al/Si compatibles avec les autres inclusions du spécimen.

Les fers issus de filière indirecte sont les seuls à présenter des inclusions possédant de fortes teneurs en chrome et vanadium (de l'ordre de quelques pour cent) avec présence éventuelle d'oxyde de chrome et de vanadium sous forme de phases parfois angulaires (voir fig. 2b). Les éléments V et Cr se retrouvent dans la fonte sous forme de carbures ( $VC$  et  $Cr_xC_y$ ). C'est l'oxydation de ces carbures dans le foyer d'affinage qui va provoquer dans les inclusions, une augmentation locale très forte de la teneur en ces éléments. Les phases angulaires sont des réminiscences des carbures angulaires. Notons que la stabilité des oxydes de ces éléments sur les carbures peut donner des indications sur les conditions thermodynamiques lors de l'affinage (Dillmann, 1998). En filière directe, les scories et inclusions auront globalement des teneurs en ces éléments du même ordre de grandeur que celles du minerai.

Précisons que, malgré tout, cette méthode est toujours tributaire de la nature du minerai employé. En effet, il sera par exemple impossible d'obtenir de fortes teneurs en vanadium, ou en chrome, si le minerai n'en contient

pas à l'origine. Des ajouts, volontaires ou involontaires peuvent également venir modifier les teneurs des éléments contenus dans ces inclusions, sans toutefois modifier ces facteurs discriminants.

L'application de ces résultats aux fers de construction des bâtiments médiévaux peut être utilisée dans une double optique :

- Elle permet tout d'abord de confirmer l'authenticité d'un élément ou d'un système de construction dans des maçonneries d'époque médiévale mais fortement restaurées ultérieurement (au XIX<sup>e</sup> siècle par exemple).

- Dans le cas de fers bien datés, cette méthode permet d'appréhender la diffusion de la filière indirecte. L'accumulation des résultats pour une ville ou une région donnée permettra à terme de cerner de manière archéométrique la période de transition entre les deux procédés.

Pour illustrer la première application, nous pouvons prendre l'exemple de la basilique de Saint-Denis. Des analyses ont pu être menées sur de petites barres de fer qui, dans le chœur à hauteur des fenêtres hautes, relient les colonnettes qui soutiennent l'arrivée des arcs-boutants à la paroi (voir fig. 3b). Ces colonnettes sont pour certaines très fortement restaurées et il apparaît légitime de s'interroger sur l'origine du système mettant en œuvre un élément de fer : date-t-il de l'origine de la construction au milieu du XIII<sup>e</sup> siècle ou fait-il partie d'une restauration moderne ou contemporaine ?

L'analyse d'une section sur une de ces barres, STDEN01a, a montré que sa matrice métallique, un mélange de fer et d'acier doux contenait des inclusions typiques du procédé de réduction directe (voir tab. 2 et fig. 2). Nous pouvons donc en conclure que cette barre ne fait pas partie d'une restauration contemporaine ou même moderne, la filière de réduction directe n'existant plus en Ile-de-France à ces périodes. Il s'agit donc selon toute vraisemblance d'un fer du XIII<sup>e</sup> siècle qui atteste la préexistence du système de renfort des colonnettes aux restaurations de la maçonnerie.

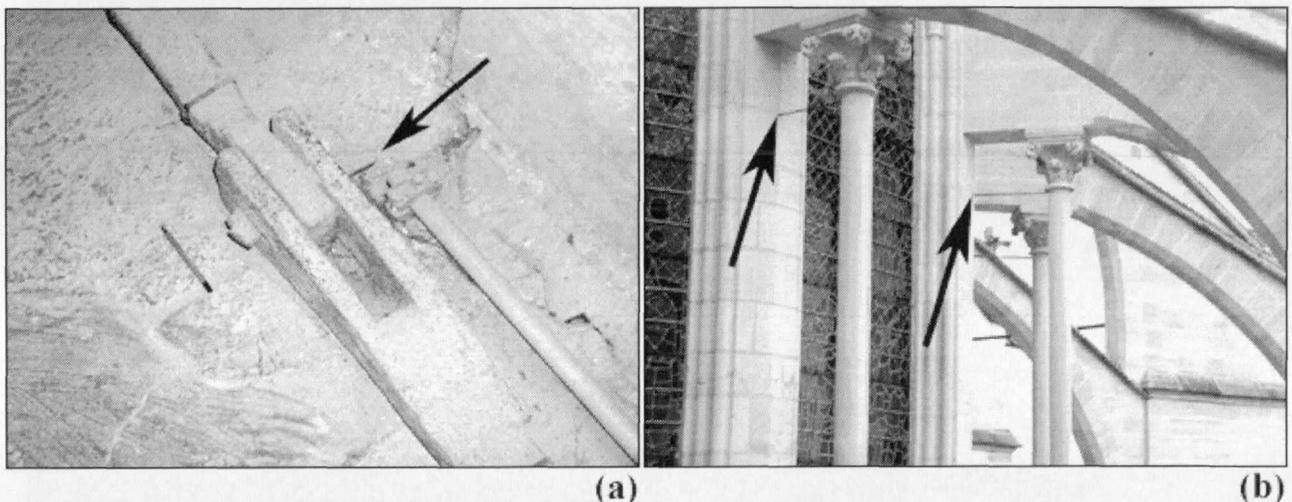


Figure 3 : (a) Chainage de la cathédrale d'Amiens. Clavette AM01a identifiée comme étant du procédé direct ; (b) Chœur de la basilique de Saint-Denis : barres de soutien au niveau du chapiteau des colonnettes portant les arcs-boutants. L'identification du procédé direct sur un de ces éléments les date du XIII<sup>e</sup> s.

Figure 3: (a) Chain in the cathedral of Amiens. The peg that blocks the chain (AM01a) is made of bloomery process iron; (b) Choir of the basilica of Saint-Denis: small bars supporting the columns that receive the upper part of the flying buttresses. The identification of the direct process on one of these bars dates the whole system from the 13<sup>th</sup> c.

Datation et localisation	Procédé de réduction mis en évidence
Donjon du château de Vincennes : chaînage et barres diverses (1336-1370)	Procédé DIRECT (JUHIN 2005 et voir Tableau 4 et Figure 5)
Palais des Papes d'Avignon : divers tirants (milieu XIV <sup>e</sup> s.)	Procédé DIRECT (DILLMANN <i>et al.</i> , 2003a et b)
Cathédrale d'Amiens : clavette du chaînage du triforium dans la partie nord de la nef, AM 01a (vers 1500) (voir Figure 3a)	Procédé DIRECT (voir Tableau 4)

Tableau 2 : Procédés de réduction mis en évidence sur les fers de construction de certains édifices gothiques français.  
 Table 2: Reduction processes evidenced on construction irons coming from a few French gothic monuments.

De futures analyses devraient avoir lieu sur ce même monument afin de déterminer la période de mise en place des gros tirants de fer qui joignent les arcs-boutants du chœur les uns aux autres.

La seconde application de la distinction des inclusions a une portée beaucoup plus large que celle du bâtiment étudié. Elle vient ajouter une pierre à l'édifice bâti par les sources historiques quant à l'apparition et la diffusion des procédés de réduction. Ajoutons de plus que les données archéologiques de terrain concernant des structures de réduction, notamment de la filière indirecte sont fort rares pour les périodes antérieures au début du XVI<sup>e</sup> siècle, que les sources écrites sont parfois silencieuses et que dans le cas de l'apparition d'un procédé, elles ne peuvent être interprétées en terme de datations que comme des *terminus ante quem*.

Les résultats obtenus sur les différents édifices ont été regroupés dans deux tableaux. Les objets ne présentant aucune inclusion caractéristique en ont été exclus (voir tab. 3).

En premier lieu, les exemples du donjon du château de Vincennes et du Palais des Papes d'Avignon confirment bien qu'au milieu du XIV<sup>e</sup> siècle le procédé indirect serait absent dans le Sud-Est de la France comme autour de Paris. Si ce résultat peut paraître évident pour les régions du Sud qui ont été plus longues que celles du Nord à adopter le nouveau procédé, il n'en est pas de même pour le Nord-Est du royaume qui, selon les textes voit l'appa-

rition de hauts fourneaux et d'affineries dès la fin du XIV<sup>e</sup> siècle : J. Rouillard cite l'exemple de la construction d'une affinerie à Saint-Liébaud Estissac (Aube) en 1377 (Rouillard, 2003). Cependant avec sa chronologie antérieure de quelques décennies, le donjon du château de Vincennes nous montre que ces hauts fourneaux n'étaient pas du tout, ou pas suffisamment implantés en région parisienne au milieu du XIV<sup>e</sup> siècle et que le plus gros de la production y était encore assuré par des bas fourneaux. Des études complémentaires sur des bâtiments avec une chronologie légèrement postérieure seraient essentielles pour permettre de préciser ce tableau.

Dans le cas de la région rouennaise, les analyses ont porté sur 3 édifices avec un total de 36 objets dont les datations s'échelonnent entre le début du XIII<sup>e</sup> siècle et le XIX<sup>e</sup> siècle. La plupart possédaient des inclusions caractéristiques permettant d'identifier le procédé de réduction duquel le fer était issu. Comme précédemment, la plupart sont issus de la filière directe sauf ceux qui proviennent de restaurations clairement identifiées sur l'édifice. Cependant, 3 objets ayant une datation au tournant des XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> siècles ont plus particulièrement attiré notre attention : il s'agit d'un goujon dans le remplage de la balustrade au 3<sup>e</sup> étage de la tour de la croisée de l'église Saint-Ouen, étage élevé entre 1492 et 1515 (Masson, 1927) et de 2 attaches de statues provenant de statues de la tour de Beurre, tour sud du massif occidental de

Datation et localisation	Procédé de réduction mis en évidence
20 objets antérieurs au milieu du XV <sup>e</sup> siècle	Procédé DIRECT (L'Heritier, 2004 et 2005 ; L'Heritier <i>et al.</i> , 2005)
Saint-Ouen de Rouen : goujon dans la balustrade du 3 <sup>e</sup> étage de la tour de la croisée (1492-1515)	Procédé DIRECT (L'Heritier, 2005)
Cathédrale de Rouen : 2 attaches de statues de la tour de Beurre (1485-1506)	Procédé INDIRECT (L'Heritier, 2004 ; L'Heritier <i>et al.</i> , 2005)
7 objets de restaurations et constructions postérieures au XVI <sup>e</sup> siècle	Procédé INDIRECT (L'Heritier, 2005)

Tableau 3 : Procédés de réduction mis en évidence sur les fers de construction des églises rouennaises.  
 Table 3: Reduction processes evidenced on construction irons coming from churches of Rouen.

la cathédrale construite entre 1485 et 1506<sup>7</sup>. L'analyse du premier a révélé la présence d'inclusions typiques du procédé direct, vitreuses dans une matrice carburée (L'Héritier, 2005), alors que les 2 dernières ont montré des inclusions avec des oxydes de chrome et de vanadium caractéristiques de la filière indirecte (L'Héritier *et al.*, 2005).

Ces 3 objets montrent par des biais archéométriques la coexistence en un même lieu de fers issus des deux procédés de réduction à la transition entre les XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> siècles. Cette coexistence coïncide parfaitement avec le tableau de la sidérurgie normande médiévale tel qu'il est actuellement connu par les sources écrites et l'archéologie de terrain : l'adoption de la filière indirecte daterait de la seconde moitié du XV<sup>e</sup> siècle avec une permanence de bas fourneaux au moins jusqu'au début du XVI<sup>e</sup> siècle (Belhoste *et al.*, 1991). D. Arribet-Deroin y cite le site du Becquet comme la première mention d'un haut fourneau en 1451. Le site de Glinet, haut fourneau et affinerie en pays de Bray normand date quant à lui de 1480 pour ses structures les plus précoces (Arribet-Deroin, 2001). Cependant, en l'absence de fouilles archéologiques, mis à part celles menées par D. Arribet-Deroin sur ce même site de Glinet, ce portrait de la sidérurgie normande repose presque uniquement sur le résultat d'un travail sur les sources écrites. Il est donc essentiel de croiser ces résultats en utilisant des sources différentes, non pas la structure de production mais le produit fini en lui-même, et d'étudier leur compatibilité.

L'analyse d'un plus grand nombre d'objets avec une fourchette chronologique légèrement plus large permettrait de rendre compte avec plus de précision de cette période de transition en Normandie ou dans la région rouennaise.

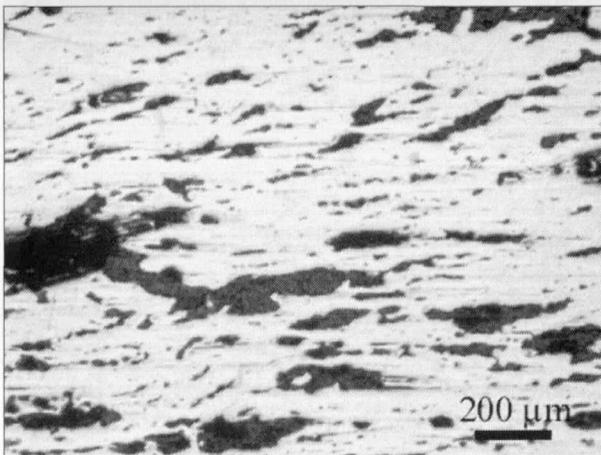


Figure 4 : Zone de mauvaise propreté inclusionnaire, spécimen ROU 301.

Figure 4: Zone with lots of slag inclusions, sample ROU 301. These slag inclusions come from non reduced components of the ore or even from additions during the forging phase. Most samples studied showed numerous slag inclusions.

De manière plus générale, tous les édifices médiévaux étudiés jusque là ont montré que le fer de réduction directe y est employé en bien plus grandes proportions que le fer de la filière indirecte, et ce malgré les quantités de fer parfois très importantes qui ont été mises en œuvre<sup>8</sup>. Il semble donc que les constructeurs médiévaux n'ont pas pu bénéficier pour leur construction de la révolution du procédé indirect permettant de produire le fer en plus grandes quantités et rendant ainsi ce matériau encore plus disponible.

#### «Qualité du matériau»

La qualité d'un objet de fer découle des différentes étapes de la chaîne opératoire pendant lesquelles il peut lui être conféré des caractéristiques particulières. Nous avons donc tenté de déterminer, par l'intermédiaire d'observations microscopiques et macroscopiques avant et après attaque des surfaces des différentes sections polies, si le fer mis en œuvre dans ces édifices est un matériau particulier qui a fait l'objet d'une sélection ou de traitements spécifiques à la forge.

L'étude de la matrice métallique des sections polies des fers de constructions médiévaux et modernes montre qu'ils sont en général de composition très hétérogène quel que soit l'édifice considéré, avec une propreté inclusionnaire assez moyenne, une répartition fer/acier quasi aléatoire, ainsi que parfois des traces de phosphore dans le métal. Rares sont les fers qui sortent actuellement de ce cadre. Nous allons détailler ces différents points successivement en y apportant des exemples.

Les procédés anciens d'élaboration du fer avant l'introduction de l'affinage en phase liquide (procédés Bessemer et Thomas, 2<sup>e</sup> moitié du XIX<sup>e</sup> siècle) induisent la présence d'un certain nombre d'inclusions dans la matrice métallique (voir fig. 4). Ces inclusions sont des composés non réduits emprisonnés alors que la matrice est à l'état solide (visqueux), pour la plupart lors de la phase de réduction en bas fourneau (filière directe) ou lors de la phase d'affinage (filière indirecte), mais elles peuvent cependant également résulter d'ajouts lors du forgeage (Dillmann, 1998). Elles sont de dimensions micrométriques à millimétriques, et sont visibles à l'œil nu sur la majeure partie des échantillons étudiés. Cependant, tous n'ont pas une propreté inclusionnaire équivalente. L'adaptation de la norme AFNOR A04-106 qui a été réalisée (voir mode opératoire et fig. 1) afin d'aller plus loin que les descriptions subjectives et de tenter de décrire plus précisément cette propreté nous donne les résultats suivants.

La quasi-totalité des échantillons a un indice compris entre 2\* et 4\* pour une moyenne de 2,9\* (tab. 4). Ces indices correspondent à une propreté moyenne à mauvaise et sont caractéristiques d'objets ayant fait l'objet d'un cinglage insuffisant lors de l'épuration de la

<sup>7</sup> Archives Départementales de la Seine-Maritime G 2511 à 2521.

<sup>8</sup> W. Haas parle de 40 tonnes à la cathédrale de Ratisbonne (Haas, 1987), J. Chapelot d'au moins 16 tonnes au donjon du château de Vincennes (Chapelot, 2004), M. L'Héritier de 15 tonnes dans les seuls vitraux de la cathédrale de Rouen (L'Héritier, 2004) et Ph. Bernardi met en évidence la mise en œuvre de 16,5 tonnes de fer pendant une partie du chantier du Palais des Papes d'Avignon (Bernardi et Dillmann, 2002).

VIN 41a	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	FeO
Barre renforçant un linteau au 5 <sup>e</sup> étage du donjon (voir Juhin, 2005).	3,1	13	66	0	6,2	11	6,8	10
	3,3	12	62	0	6,2	11	8,2	13
	3,0	12	63	0	6,3	11	8,6	11
STDEN 01a	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	FeO
Barre de colonnette d'un arc-boutant du chœur.	1,1	14	53	0,60	4,3	6,4	2,8	18
	0,95	13	50	2,0	4,3	4,9	3,8	21
AM 01a	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	FeO
Clavette du chaînage, triforium nord de la nef.	1,8	17	57	0	7,5	6,0	1,8	8,8
	1,7	15	47	0	5,4	8,6	2,2	19

Tableau 4 : Compositions élémentaires des inclusions caractéristiques du procédé direct pour les spécimens VIN 41a, STDEN 01a, AM 01a.

Table 4: Elementary composition of the slag inclusions which are characteristic for the bloomery process, samples VIN 41a, STDEN 01a, AM 01a.

loupe et du forgeage. Ces inclusions constituent autant de points faibles dans la structure du matériau d'où une moindre résistance et sont une première preuve indiquant qu'aucun soin particulier n'était en général accordé à la réalisation de ces objets.

Quelques rares spécimens analysés ont une propreté proche de 5\*, correspondant à des inclusions centimétriques. Le taux de porosité y est alors supérieur à 4 %, certains allant même jusqu'à 15 %. Les objets résultant de ce travail ont effectivement un comportement mécanique très hétérogène et difficile à appréhender<sup>9</sup>.

En contrepartie, quelques rares objets ont comparativement une propreté assez exceptionnelle d'indice 1\* ou inférieur (porosité inférieure à 0,3 %). On y compte notamment une agrafe, OUEN 03, ainsi que les tirants de la galerie du grand promenoir du Palais des Papes d'Avignon dont la section ne présentait aucune inclusion visible à l'œil nu (Dillmann *et al.*, 2003). L'extrême propreté de ces éléments suggère au contraire qu'il y a eu un travail spécifique du forgeron afin d'expurger au mieux les inclusions pour obtenir un matériau le plus exempt d'impuretés possible.

Le classement effectué selon les indices de propreté inclusionnaire ne révèle cependant aucune dichotomie. Cette propreté ne semble pas liée à un type d'objet particulier : goujons, agrafes, attaches de statue, chevilles se répartissent de manière égale entre les différents indices, des plus propres aux plus sales. Même les tirants sont de qualités très diverses : face à l'exemple des barres du Grand Promenoir, on peut citer le cas des autres barres analysées sur ce même palais (Dillmann *et al.*, 2003), ou encore les sections de tirants OUEN01a et OUEN11a de l'église Saint-Ouen. Ces derniers, s'ils n'ont pas fait l'objet d'une étude précise et chiffrée de leur propreté, puisqu'il ne s'agit pas de sections longitudinales, présentaient néanmoins de nombreuses inclusions en coupe interdisant un indice inférieur à 1\*.

Ces indices n'ont pas non plus pu être reliés au degré de carburation des objets : les sections OUEN 03 et OUEN 09 qui sont parmi les plus propres sont à dominance perlitique, mais il en est de même pour OUEN 05

et OUEN 10 qui sont parmi les plus sales. De plus, la plupart des spécimens sont en général à moitié ferritiques et à moitié carburés, ce qui rend une telle dichotomie encore plus difficile.

L'hétérogénéité fer/acier ne caractérise quant à elle que les échantillons issus du procédé direct, les fers de la filière indirecte que nous avons analysés étant le plus souvent exempts de carbone. Le carbone, censé conférer une plus grande dureté au matériau, montre lorsqu'il est présent, une répartition aléatoire (voir fig. 5). Même les analyses réalisées sur 2 esquilles de tirants de l'église Saint-Ouen ont montré qu'il s'agissait d'un métal ordinaire, impossible à différencier de celui des autres éléments de fer mis en œuvre dans l'édifice (L'Heritier, 2005).

Les structures en bandes observées sur certaines sections comme les goujons OUEN 05 et OUEN 08, les agrafes OUEN 09 et OUEN 10 ou encore les 6 attaches de statue de la cathédrale de Rouen sont la conséquence de l'aplatissement d'un lopin hétérogène sous l'effet du martelage (voir fig. 6). Elles sont logiquement présentes sur les objets les plus allongés (barres, agrafes...).

De plus, les rares structures de trempe observées ne résultent *a priori* pas d'actions délibérées de la part du forgeron de renforcer le matériau à un endroit précis. Par exemple la trempe en partie supérieure du goujon ROU TN7 n'a aucune utilité particulière (L'Heritier *et al.*, 2005). Tous les autres goujons analysés, en particuliers ceux qui ont été prélevés au même endroit que ROU TN7, à savoir ROU TN6, ROU TS5 et ROU TS6 ne sont même pas carburés en pointe, et ne portent donc *a fortiori* pas de structure de trempe. De plus, il est légitime de s'interroger sur la nécessité de renforcer de cette manière la pointe d'un goujon, élément qui n'est pas forcément soumis à des forces très importantes. Il est donc plus probable que ces trempes soient accidentelles, peut-être à cause d'un refroidissement trop rapide à l'air après forgeage.

Parmi tous les fers analysés, seules dénotent à nouveau les barres de la Galerie du Grand Promenoir du Palais des Papes d'Avignon (Dillmann *et al.*, 2003). Elles sont constituées d'un acier relativement homogène dont nous avons vu qu'il était par ailleurs très bien épuré.

<sup>9</sup> Les récents résultats d'A. Juhin sur la tenue mécanique de différentes barres de fer du donjon de Vincennes ont montré un comportement fragile et ductile à quelques millimètres de distance dans le même objet (Juhin, 2005).

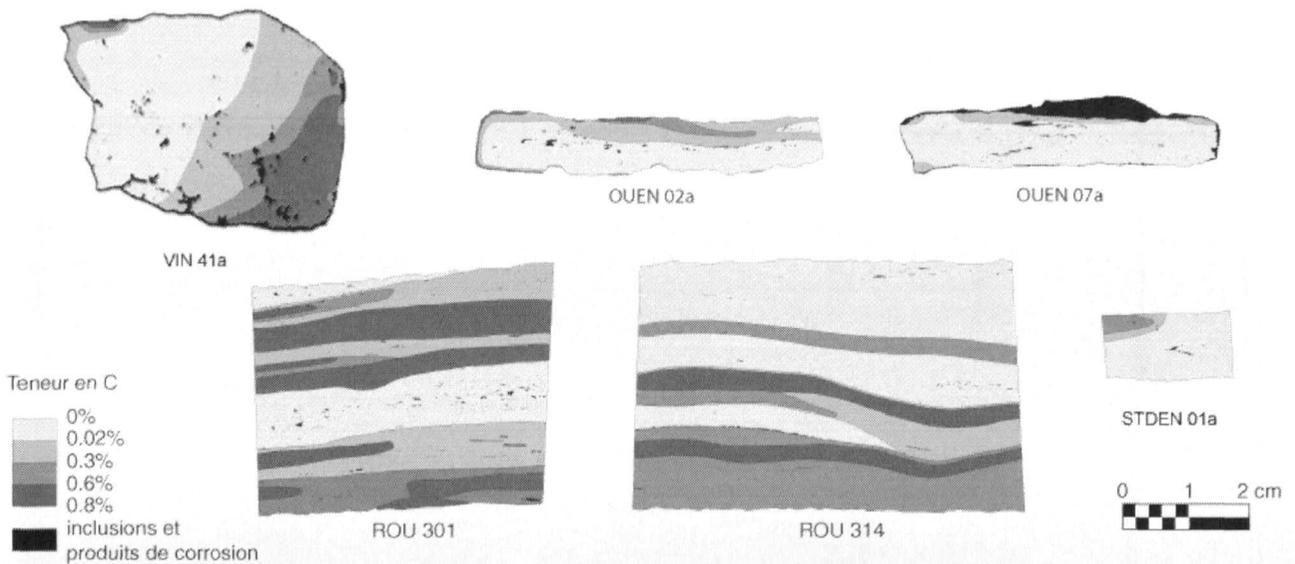


Figure 5 : Schéma de la structure métallique des sections ROU 301, ROU 314, OUEEN 02a, OUEEN 07a, STDEN 01a et VIN 41a après attaque Nital.  
 Figure 5: Metallic structure of the samples ROU 301, ROU 314, OUEEN 02a, OUEEN 07a, STDEN 01a and VIN 41a after Nital etching. The carburised zones have no particular distribution. The band structures observed are only the result of the flattening of a heterogeneous ingot.

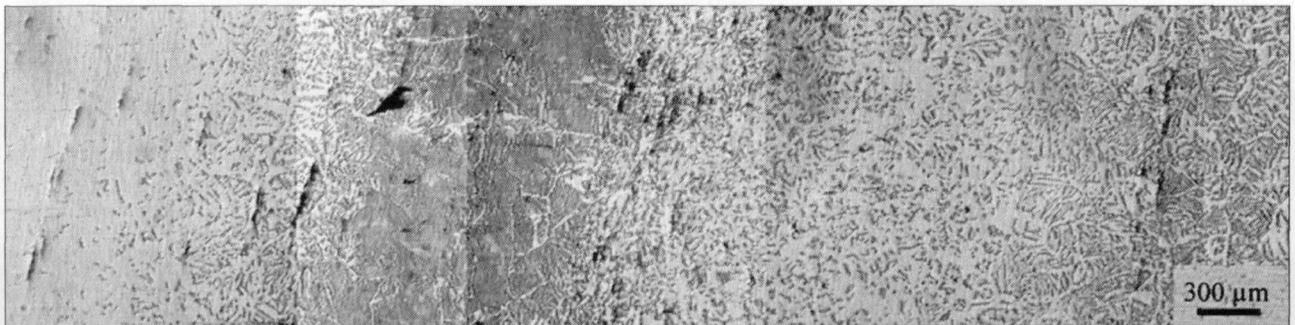


Figure 6 : Micrographie du spécimen ROU 314 au niveau d'une structure en bandes, attaque Nital.  
 Figure 6: Micrograph of the sample ROU 314 showing a band structure, Nital etching.

Le phosphore est quant à lui présent dans la plupart des éléments de fer qui ont pu être analysés (voir fig. 7a). Il a été mis en évidence à la fois à l'attaque Nital avec la présence de structures fantômes dans les zones ferritiques d'environ un spécimen sur deux (voir fig. 7b) et aussi par dosage des inclusions et de la matrice métallique, réalisées respectivement en spectrométrie EDS et WDS comme indiqué dans le mode opératoire (voir tab. 5).

Le phosphore rend le fer plus cassant à froid ainsi que lors d'un forgeage à chaud (Stewart *et al.*, 2001). Depuis bien longtemps, des nombreux auteurs citent les méfaits de cet élément qui a depuis été banni de la métallurgie contemporaine. Cependant la multiplication des études archéométriques, à commencer par celles de J. Piaskowski (Piaskowski, 1989) et plus récemment celles de E. Vega (Véga *et al.*, 2002 ; Véga *et al.*, 2003) a fini par montrer que les fers archéologiques sont souvent très phosphoreux. Les teneurs observées pour nos spécimens dépassent de beaucoup les 400 ppm tolérés pour les aciers actuels ; des dosages montrent même que certains dépassent localement le seuil critique de 0,38 %<sub>mass</sub> évoqué par Stewart au-delà duquel le phosphore fragilise notablement le fer (Stewart *et al.*, 2001).

Longtemps controversée, la question de l'utilisation et du forgeage du fer phosphoreux est encore problématique, d'autant plus que les teneurs évoquées ne peuvent pas être sans conséquence sur le comportement du métal à froid comme à chaud. Une première hypothèse apportée par E. Vega proposait que ces fers puissent être aisément forgés à une température n'excédant pas les 900°C, restant ainsi dans un domaine exclusivement ferritique pour éviter toute fragilisation (Véga *et al.*, 2002). Ce ne semble cependant pas être le cas de tous les objets puisque l'on a la présence de nombreuses structures fantômes qui traduisent un passage du fer en phase austénitique. Par ailleurs des traces de fissuration due à la nature phosphoreuse du métal ont également parfois été retrouvées, comme sur le spécimen ROU TS6 (L'Héritier, 2003). La section de ce goujon possède un alignement d'inclusions transversal à l'objet. Les inclusions y prennent des formes en L et U comme si elles épousaient les joints de grain (voir fig. 7c et d). De plus l'attaque Oberhofer a montré que cet alignement correspond à une zone de dépression en phosphore qui ne vient cependant pas troubler la structure en bandes longitudinales à l'objet. Il s'agit donc vraisemblablement là d'une fissure qui s'est

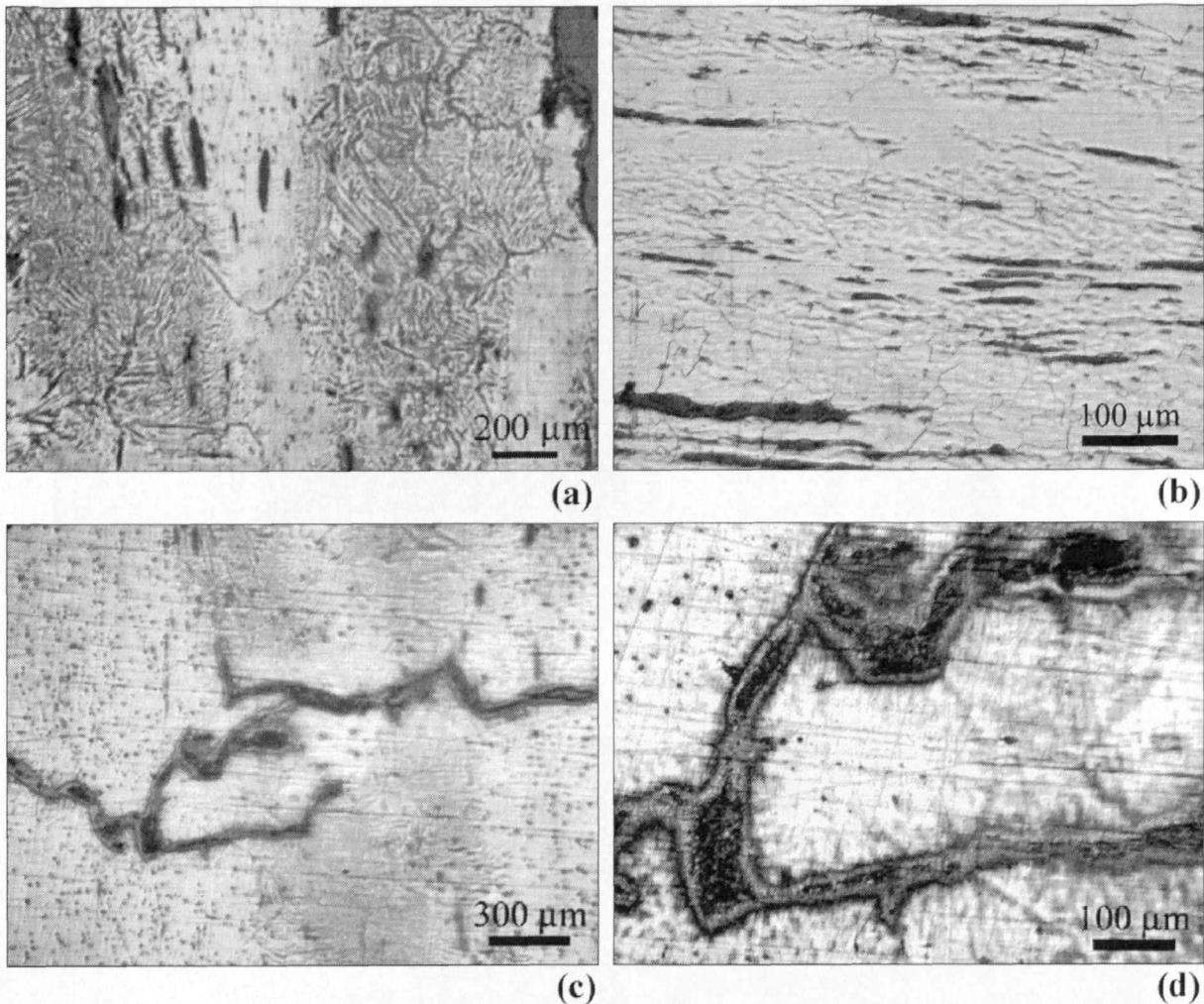


Figure 7 : (a) Variations mésoscopiques et microscopiques de la teneur en phosphore, spécimen ROU TN6, attaque Oberhoffer ; (b) Structures fantômes, spécimen OUEEN 15a, attaque Nital ; (c) et (d) Fissure remplie d'inclusions dans l'échantillon ROU TN6, attaque Oberhoffer.

Figure 7: (a) Mesoscopic and microscopic variations of the phosphorus content, sample ROU TN6, Oberhoffer etching. Phosphoric band structures also result from the forging; (b) Ghost structures showing phosphorus content microscopic variations, sample OUEEN 15a, Nital etching; (c) and (d) Crack in the matrix of ROU TN6, Oberhoffer etching. This crack appeared during the forging phase as it was filled with slag inclusions. This shows that phosphorous iron wasn't an easy material to forge, though medieval smiths certainly had a particular savoir-faire.

développée aux joints de grain lors du forgeage à chaud, puisque les inclusions ont pu s'y glisser à l'état liquide, et qui est selon toute vraisemblance liée à la nature phosphoreuse du métal composant l'objet.

Ces différents exemples prouvent d'une part que les forgerons médiévaux avaient un savoir-faire pour forger ce matériau, ou bien qu'ils savaient tout du moins s'accommoder de ses inconvénients, mais d'autre part, que leur forgeage n'était probablement pas aussi aisé que l'accumulation des exemples pourrait le laisser envisager. Il est impossible de savoir combien d'objets se sont ainsi fissurés et ont dû être reforgés.

Il semble donc que le fer mis en œuvre dans la construction monumentale médiévale et moderne soit un matériau très ordinaire pour ces périodes, qui, après une épuration plutôt peu poussée, n'a ni fait l'objet d'un tri, ni reçu de traitements thermo-chimiques spécifiques à la forge afin de lui conférer des propriétés particulières. Sa structure métallographique est proche de celle du lopin de fer après la première phase d'épuration à la sortie du fourneau, le (ou les) forgeron(s) ayant travaillé ce métal s'étant contenté(s) de le mettre en forme. Il faut cependant relativiser cette qualité du produit fini. Cette notion

est en effet un concept difficile à manier car il est entaché d'une vision contemporaine qui fausse la perception au Moyen Age. Un matériau aux caractéristiques micro-structurales hétérogènes peut être amplement suffisant mécaniquement s'il est correctement dimensionné par rapport à l'usage auquel il est destiné. Or, tous ces objets sont restés en place depuis leur mise en œuvre et ne se sont ni rompus ni fissurés sauf quand ils ont été gagnés par la corrosion. Ils ont donc rempli le rôle qui leur était assigné à l'époque et il est possible d'affirmer qu'une qualité supérieure n'était nullement requise. Il faut de plus ajouter que la plupart de ces éléments n'étaient pas nécessairement soumis à des forces très importantes, les attaches de statue ou certaines agrafes ayant par exemple plus un rôle de sécurité et les goujons ne se limitant qu'à la statique d'une colonnette ou d'un pinacle. De plus dans bien des cas, le facteur limitant est la résistance de la pierre et non celle du métal.

Seuls les tirants de la Galerie du Grand Promenoir du Palais des Papes d'Avignon constitués d'un acier homogène et très bien épuré, font exception à ce tableau. Ph. Bernardi les avait mis en relation avec l'achat de barres pour la grande Chapelle au coût exorbitant de 24 sous la livre

référence	type	datation	propreté moyenne
OUEN 03	agrafe	1350-1450	1*
OUEN 09	agrafe	1350-1450	1,8*
ROU TS5	goujon	déb. XIIIe s.	1,9*
OUEN 16	cheville	XVIIIe s.	2*
ROU TN7	goujon	déb. XIIIe s.	2,1*
ROU CHI	cheville	déb. XIIIe s.	2,1*
ROU 35.2	attache de statue	fin XVe s.	2,2*
OUEN 04	goujon	1350-1450	2,3*
OUEN 07	agrafe	déb. XIVe s.	2,3*
OUEN 17	cheville	XVIIIe s.	2,3*
OUEN 13	goujon	XIXe s.	2,5*
OUEN 19	agrafe	déb. XIVe s.	2,5*
ROU 316	attache de statue	déb. XVe s.	2,6*
ROU 35.1	attache de statue	déb. XVe s.	2,6*
ROU 314	attache de statue	déb. XVe s.	2,8*
ROU TS6	goujon	déb. XIIIe s.	3*
OUEN 15	cheville	XVIIIe s.	3*
ROU 301	attache de statue	déb. XVe s.	3,1*
OUEN 02	agrafe	déb. XIVe s.	3,1*
OUEN 06	agrafe	déb. XIVe s.	3,1*
Goujon Reims	goujon de statue	déb. XIIIe s.	3,2*
OUEN 08	goujon	1350-1450	3,2*
ROU TN6	goujon	déb. XIIIe s.	3,3*
OUEN 21	goujon	XIXe s.	3,6*
OUEN 05	goujon	1350-1450	3,8*
ROU 35.3	attache de statue	fin XVe s.	3,8*
OUEN 12	goujon	1350-1450	4,3*
OUEN 10	agrafe	1350-1450	4,7*

Tableau 5 : Indices de propreté inclusionnaire avec modification de la norme AFNOR NF A04-106.

Table 5: Slag inclusion cleanliness measured on construction irons according to the modification of the AFNOR norm NF A04-106.

contre 9 deniers habituellement soit plus de 30 fois le prix des barres de fer classiques (Bernardi et Dillmann, 2002). S'il semble ici y avoir au moins ponctuellement commande et utilisation d'un matériau spécifique, nous n'en avons aucune évidence pour les autres éléments étudiés.

### Volume et temps de travail

Après s'être intéressés à la qualité du produit fini, il convient de revenir sur certaines des grandes étapes de la chaîne opératoire. En réduction directe, dont nous avons vu qu'elle prédomine dans le cas des fers de construction médiévaux, après réduction du minerai, la première d'entre elles est l'étape d'épuration qui consiste à transformer la loupe sortant du bas fourneau en un lopin de fer forgeable, produit semi-fini. Une opération d'archéologie expérimentale a été menée dans ce but sur le site de Paimpont (Ille-et-Vilaine) en Août 2004 : l'épuration d'une loupe de fer obtenue par réduction directe y a été réalisée. Cette expérimentation a permis de rendre compte du temps de travail nécessaire en post-réduction pour obtenir un morceau de fer forgeable ainsi que de la masse de fer récupérée par rapport à celle de la loupe sortant du fourneau. Cette phase encore fort peu connue en archéométrie, et bien souvent occultée par l'opération de réduction en elle-même mérite en effet une certaine attention : elle

représente à elle seule un travail assez considérable qui a très certainement un poids important dans la conduite de la chaîne opératoire, comme en attestent les résultats qui vont suivre.

L'épuration se déroule en 2 phases :

- La première phase (épuration phase I) voit le compactage de la loupe, essentiellement réalisée au maillet, afin d'en supprimer les porosités.

- La seconde phase (épuration phase II) voit le cinglage du produit obtenu en fin de phase I et son compactage par des replis successifs, afin d'en expurger une grande partie des inclusions et de le transformer en un lingot forgeable. Cette seconde phase est réalisée au marteau.

La distinction entre ces deux phases peut être marquée à un ou deux cycles chaude/martelage près par le changement d'outil du forgeron.

Le temps total de cette opération d'épuration pour obtenir, à partir d'une loupe de 14 kg sortie du bas fourneau, un lingot de fer forgeable d'une masse de l'ordre du kilogramme a été de 4 h 20, avec une succession d'une quarantaine de cycles chaude/martelage (voir tab. 6 et tab. 7). Chaque chaude et chaque martelage a duré entre 2 et 5 mn en moyenne. La phase II représente à elle seule près de 30 cycles et plus de 3 h de travail pour le forgeron. A ce temps il faudra encore ajouter celui de la mise en forme, qui peut notamment comprendre des opérations de soudure de différents lingots dans le cas du forgeage d'objets de plusieurs dizaines de kg, comme des grosses barres ou des tirants mis en œuvre dans la construction monumentale.

Ces premiers résultats montrent l'importance du temps et de l'énergie consacrés à l'étape de forge et en particulier à celle de l'épuration. En exceptant le rendement assez faible de l'opération avec une loupe de départ de relativement petites dimensions, il semble capital d'insister sur le temps de travail qu'elle nécessite, car il peut s'agir là d'une véritable étape limitante dans la chaîne opératoire de la production du fer. Dans son article consacré à l'emploi du fer dans les cathédrales gothiques (Benoit, 2002), P. Benoit estime que la capacité maximale de production d'un bas fourneau non activé à l'énergie hydraulique est de 20 kg de fer en barres, ce qui correspond déjà à une loupe de plusieurs centaines de kg. C. Verna mentionne comme capacité de production pour des moulins utilisant l'énergie hydraulique une masse d'environ une tonne par semaine (Verna, 2001). Ces chiffres qui semblent insister sur la capacité de réduction des bas fourneaux ne doivent cependant pas être interprétés ainsi ; c'est pourtant le travers qu'il est aisé de réaliser en faisant uniquement des estimations sur le nombre de réductions nécessaires à la production d'une certaine quantité de métal. Il est vrai que les bas fourneaux médiévaux avaient dans la plupart des cas une capacité de production limitée, mais en réalité quelle que soit la masse de la loupe au sortir du bas fourneau, le temps nécessaire à son épuration y sera certainement à peu près proportionnel. En effet, le forgeron ne pourra certainement pas manier seul une loupe d'une cinquantaine de kg ou plus. Il lui sera plus pratique de briser cette loupe de grandes dimensions pour la compacter en plusieurs fois, ce qui allonge le temps de la première phase de l'épuration ou nécessite un nombre plus important

Échantillon	Teneur max. de P dans la matrice	Teneur moy. de P sur 60 dosages	Teneur max. de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> dans les inclusions
ROU 35/2	3940 ppm	1300 ppm	20 % <sub>mass</sub>
ROU 35/3	4390 ppm	1390 ppm	20 % <sub>mass</sub>
ROU TS5	2060 ppm	1160 ppm	14 % <sub>mass</sub>
ROU TS6	1160 ppm	390 ppm	8 % <sub>mass</sub>
ROU CH1	2000 ppm	400 ppm	7 % <sub>mass</sub>

Tableau 6 : Teneurs minimales et moyennes en phosphore dans la matrice métallique et dans les inclusions, d'après les dosages en spectrométrie EDS et WDS.

*Table 6: Maximal and average phosphorus contents in the matrix and in the slag inclusions according to the EDS and WDS analyses showing that irons used in medieval buildings were often phosphorous. Phosphorus is known to render iron brittle when cold and also when forged at high temperatures (1100-1400° C). The use of a phosphorous metal therefore requires particular techniques of forging.*

Temps	Opération	Masse de la loupe (kg)	Remarques
0:00	Chaude	14	Ajout de charbon de bois.
0:03	Martelage		Maillet.
0:05	Chaude		Ajout de charbon de bois.
0:08			Ajout de charbon de bois.
0:11			Ajout de charbon de bois.
0:14	Martelage	13	Maillet.
0:16	Chaude		
0:18			Ajout de charbon de bois.
0:21	Martelage	11	Maillet. Perte d'un fragment important. Echantillonnage.
0:23	Chaude		
0:26			Déplacement de la loupe dans le foyer. Ajout de charbon de bois.
0:29	Martelage		Maillet.
0:30	Chaude		
0:32			Déplacement de la loupe dans le foyer. Ajout de charbon de bois.
0:35			Déplacement de la loupe dans le foyer. Ajout de charbon de bois.
0:37			Déplacement de la loupe dans le foyer. Ajout de charbon de bois.
0:40	Martelage	7	Maillet. Quantité importante de scorie dans le foyer.
0:42	Chaude		
0:46	Martelage	7	Maillet.
0:48	Chaude		
0:50	Martelage		Maillet.
0:52	Chaude		
0:54	Martelage		Maillet.
0:56	Chaude		
0:59	Martelage		Le métal est plus compact et peut être martelé avec un marteau en acier.
1:00	Chaude		
1:03	Martelage	5	
1:04	Chaude		
1:09	Martelage	4	Fissures importantes. Nécessité de forger avec ajouts.

Tableau 7 : Épuration phase I : temps de travail par opération et perte de masse de la loupe.

*Table 7: Cleansing phase I: working time per operation and loss of weigh of the bloom.*

de forgerons qui travailleraient simultanément. Pour la seconde phase, même en admettant que l'on décide de souder différents lopins de fer en cours d'épuration issus de la phase I pour réduire le nombre d'opérations, il est évident que plus la masse de fer à compacter est grande, plus il faudra faire de replis et plus le temps et l'énergie consacrés seront importants. Ici, pour un lopin d'à peine

quelques kilogrammes, 3 replis et 3 h de travail ont déjà été nécessaires. En revanche, l'opération de réduction proprement dite ne nécessite guère plus d'efforts qu'il s'agisse d'un fourneau de grandes ou petites dimensions et un même ouvrier ou groupe d'ouvriers peut alimenter en minerai plusieurs fourneaux à la fois qui tourneraient simultanément. De plus, le temps de réduction n'est pas

non plus directement proportionnel à la charge de minerai réduit, notamment à cause des phases de montée en température et de chauffage de la colonne.

Tous ces éléments vont dans le sens que l'étape limitante dans la chaîne opératoire de production du fer selon le procédé direct serait celle de l'épuration qui nécessite un nombre plus important de travailleurs spécialisés. Dans le cas de la filière indirecte, il est évident que la réduction n'est pas étape limitante. Le réel manque de connaissances sur la phase d'affinage surtout pour les périodes les plus précoces ne permet cependant pas de pousser plus loin la réflexion. Il est néanmoins certain qu'affinage et épuration nécessitent un travail bien plus important et spécialisé que la fonte du minerai dans le haut fourneau.

Ces résultats posent également une fois de plus la question de l'utilisation du marteau hydraulique. S'il n'est pas envisageable qu'il intervienne lors de la phase I de l'épuration, puisque la loupe, poreuse et fragile ne nécessite pas un martelage puissant et risquerait de se fragmenter sous les coups d'un tel marteau, il peut cependant permettre de réduire notablement les efforts du forgeron ainsi que le temps de travail lors de l'épuration phase II. La présence de cette machine pendant le Moyen Âge est cependant controversée dans certaines régions, notamment en Normandie où une partie de notre corpus a été étudié (Arnoux, 1993 ; L'Héritier, 2004). Rappelons cependant que la production nécessaire au chantier de ces grands monuments se chiffre en dizaines de tonnes par édifice (Haas, 1987 ; L'Héritier, 2004), et il semble de ce fait évident que cette innovation a partout joué un grand rôle en permettant d'alléger le travail du forgeron et de réduire le temps de travail. Malheureusement, les évidences archéologiques de l'utilisation du marteau hydraulique sur des objets sont encore très rares (Dillmann *et al.*, 2003 ; L'Héritier, 2005) et les structures métallographiques qu'il est susceptible de générer sont pour l'instant inconnues.

De nouvelles expérimentations devront être réalisées pour mieux appréhender le temps nécessaire à l'épuration de loupes de différentes tailles, avec ou sans l'utilisation du marteau hydraulique.

### La question de la récupération

Après l'épuration vient la mise en forme à laquelle de nombreuses interrogations peuvent être liées, notamment quant à la nature du lopin de fer employé qui peut provenir d'une seule et même loupe ou bien de la récupération et du corroyage de fers d'origines différentes. Se pose également la question de l'utilisation d'ajouts ainsi que de l'origine de certaines soudures visibles en microscopie optique. L'étude de la composition élémentaire des inclusions non métalliques et en particulier de plusieurs rapports caractéristiques apporte des éléments de réponse à ces différentes interrogations. Elle permet également d'avancer des hypothèses sur la provenance de certains objets.

Les rapports  $Al_2O_3/SiO_2$ ,  $SiO_2/CaO$  et  $Al_2O_3/CaO$  et leurs variations dans l'objet ont été évalués pour un grand nombre de spécimens afin de considérer l'homogénéité des objets à travers celle des inclusions. Les éléments

silicium, aluminium et calcium proviennent du minerai, mais également du charbon de bois (Ca), des parois du fourneau de réduction (Al, Si) ou encore d'éventuels ajouts lors de la réduction, notamment des ajouts de fondants calciques. Pour une opération de réduction donnée, les rapports  $Al_2O_3/SiO_2$ ,  $SiO_2/CaO$  et  $Al_2O_3/CaO$  ne sont donc pas susceptibles d'évoluer dans les scories macroscopiques en fonction de la variation locale de rendement de la réduction des oxydes de fer. Ils ont peu de chance d'être identiques pour deux opérations de réduction distinctes, surtout avec des minerais différents.

Dans les inclusions, du fait de la fragmentation de celles-ci durant les divers processus de post-réduction de la chaîne opératoire, cette constance des rapports est susceptible de se perdre. Cependant il a été montré que dans certains cas favorables, ce rapport était remarquablement conservé (L'Héritier *et al.*, 2003). Le rapport entre ces différents éléments constitue une sorte de signature chimique de l'échantillon.

Cette même constatation a été faite sur les fers de construction. Les alignements sont en général également conservés pour les inclusions de différents spécimens découpés sur un même objet (voir fig. 8). Ceci implique, pour un lopin qui présenterait des zones hétérogènes (fer/acier), une origine commune (même réduction) de ces différentes zones (L'Héritier *et al.*, 2003). Les structures en bandes, comme celle observée sur OUEEN 05, seraient donc bien la conséquence d'une hétérogénéité intrinsèque au lopin de fer utilisé et non au corroyage de morceaux de fer et d'acier d'origines différentes dans une optique de recyclage par exemple. De même, certaines lignes de soudure comme celle de OUEEN 06b doivent, d'après l'homogénéité des inclusions, plutôt être interprétées comme les marques d'un repli effectué à la forge pendant la phase d'épuration par exemple. D'autres études montrent par ailleurs que, lorsqu'il s'agit au contraire d'une soudure de matériaux d'origines différentes, les rapports considérés sont en général bien distincts (L'Héritier *et al.*, 2003 ; Dillmann *et al.*, soumis).

La constance dans les rapports évoqués, observée pour près de la moitié des échantillons étudiés semble donc montrer que le fer «neuf», ne résultant pas de l'agglomération de lopins épars, tient une part relativement importante dans l'approvisionnement de ces grands édifices. Il paraît donc probable que le fer neuf et les fers recyclés dont l'importance est quant à elle montrée par les livres de comptes médiévaux (L'Héritier, 2004), étaient tous deux utilisés lors de la construction de ces bâtiments, le corpus étudié ne révélant cependant pas une utilisation particulière de l'un ou de l'autre pour la confection d'un type d'objet particulier.

Les caractéristiques de ces rapports qui constituent comme nous l'avons évoqué une sorte de signature chimique des échantillons, alliés à la présence ou l'absence de certains autres éléments comme le phosphore ou le manganèse peuvent permettre d'étudier la compatibilité entre différents objets pour savoir s'ils sont ou non susceptibles de provenir d'un même atelier. Ceci est notamment applicable dans le cas d'objets situés à un même niveau dans l'édifice, et qui ont été mis en œuvre à une même période.

Citons par exemple le cas des 4 attaches de statue de la cathédrale de Rouen qui proviennent de la façade occidentale et ont été mises en place entre la fin du XIV<sup>e</sup> et le début du XV<sup>e</sup> siècle (L'Heritier, 2003). Pour 3 d'entre elles, ROU 314, ROU 316 et ROU 35/1, les rapports  $Al_2O_3/SiO_2$ ,  $SiO_2/CaO$  et  $Al_2O_3/CaO$  sont similaires, et de plus, leurs inclusions sont non phosphoreuses et ont des teneurs moyennes en manganèse équivalentes. Le dernier, ROU 301, montre un alignement des mêmes rapports de pente sensiblement différente (voir fig. 8). Ses inclusions sont également manganésifères et non phosphoreuses. Il ne semble cependant pas compatible avec les 3 autres. L'hypothèse peut donc être émise que ROU 314, ROU 316 et ROU 35/1 ont une origine commune, et il est possible qu'ils proviennent d'un même atelier de production. La proximité de ROU 314 et ROU 316, qui soutenaient 2 statues voisines fort probablement posées lors de la même phase de construction va bien dans le même sens : ces 2 attaches font probablement partie de la même commande. ROU 301 pourrait peut-être avoir une origine différente (atelier distinct, utilisation d'un autre minerai, traitement différent lors de la phase de forge ou d'épuration...).

L'étude de la composition des inclusions peut également renseigner sur les différents ajouts qui ont eu lieu pendant l'étape de forge. Ces ajouts sont en effet susceptibles de créer de nouvelles inclusions ayant une composition radicalement différente des inclusions fayalito-wüstitiques rencontrées habituellement.

Le goujon OUEEN 08 montre à ce titre, outre un bon alignement d'une partie de ses inclusions, la présence de nombreuses inclusions très riches en silice (entre 70 et 90 %<sub>mass</sub>) qui se détachent nettement de cet alignement pour former un groupe bien distinct (voir fig. 8). Elles sont très certainement la marque de l'ajout de sable pendant le forgeage, qui sert à protéger le lopin de l'oxydation et ainsi éventuellement favoriser les soudures lors des replis. Aucune trace de soudure n'a cependant pu être décelée en microscopie optique sur cet échantillon.

Aucun autre objet ne présentait de manière aussi claire de telles inclusions. Précisons que le sable, lorsqu'il est utilisé, doit cependant être expurgé lors de la soudure pour ne pas diminuer la soudabilité du matériau. Il est donc fort possible que seul un nombre très faible de grains reste prisonnier de la matrice métallique qui n'auront pas été analysés. L'exception de OUEEN 08 est dans le nombre très important de ces inclusions très riches en silice.

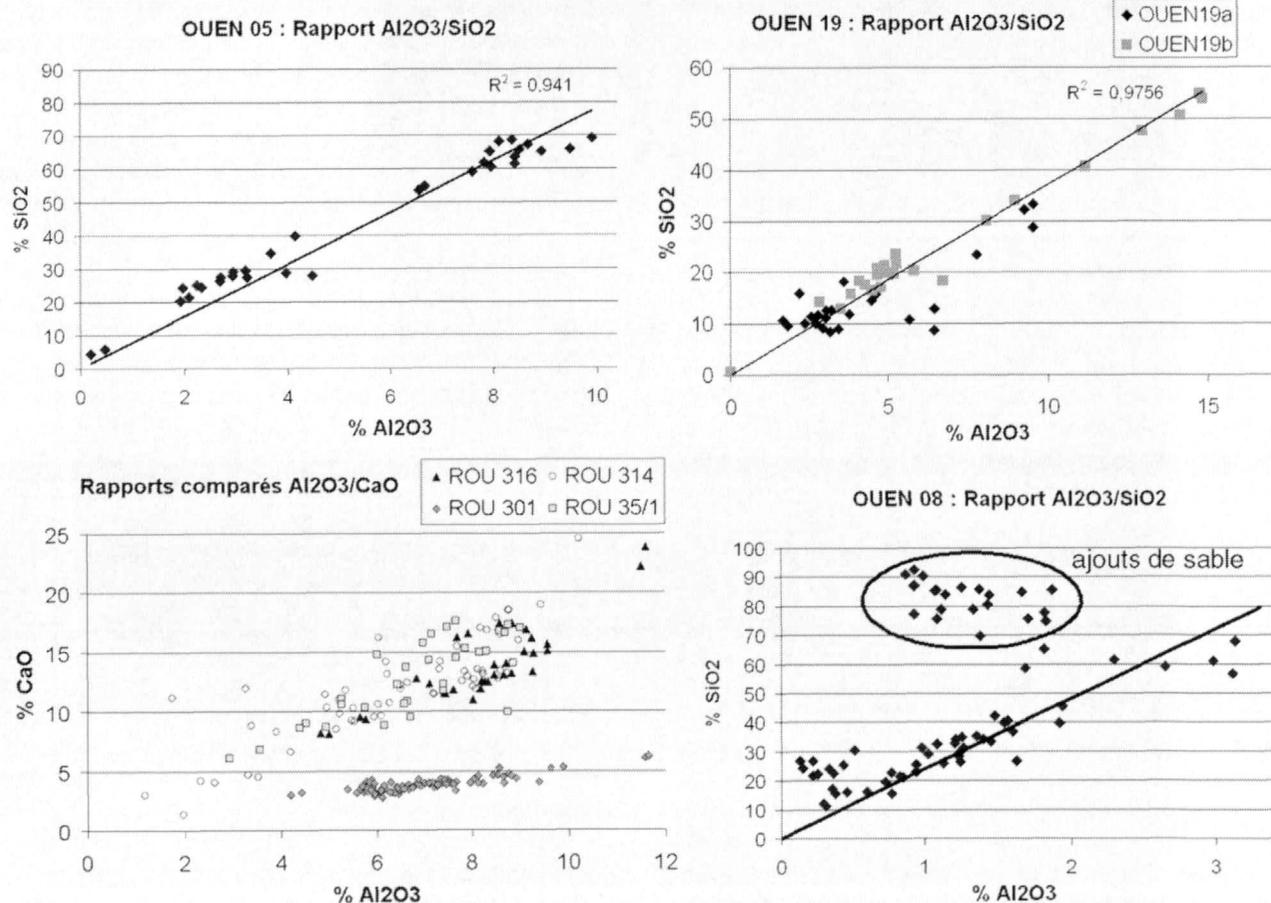


Figure 8 : Exemples de rapports  $Al_2O_3/SiO_2$  et  $Al_2O_3/CaO$ , montrant la signature chimique des objets et l'identification d'ajouts de sable.

Figure 8: Examples of  $Al_2O_3/SiO_2$  and  $Al_2O_3/CaO$  ratios showing the chemical signature of the objects. Samples OUEEN 05, OUEEN 08 and OUEEN 19 show really a really good alignment which tends to prove that the slag inclusions are homogeneous and therefore that the metal comes from a single bloom, especially in the case of OUEEN 19 where several sample have been analysed on the same object. Sample OUEEN 08 shows beside the alignment a group of inclusions very rich in  $SiO_2$ . They are probably the mark of sand additions used during the cleansing and forging stages. The graph on the bottom left shows the compatibility of 3 statue clamps coming from the western façade of the cathedral of Rouen, according to this chemical signature. They could possibly come from the same site of production especially since two of them were located on contiguous statues. The fourth one, ROU 301, has a different  $Al_2O_3/CaO$  ratio and is therefore incompatible.

Nombre de cycles	Opération	Opération	Temps moyen par opération (mn)
9	Martelage. Perte d'un gros bloc en fin d'opération.	Chaude	5
		Martelage	2
8	Martelage.	Chaude	2
		Martelage	2
4	Premier repli.	Chaude	4
		Martelage	4
1	Second repli.	Chaude	3
		Martelage	13
6	Troisième repli. Produit : lingot forgeable	Chaude	3
		Martelage	2
Durée totale : 3h13			

Tableau 8: Travail réalisé lors de l'épuration phase II avec le temps moyen par opération.

Table 8: Different stages of cleansing phase II with average time per operation. This experiment shows that the cleansing phase was a long and tiring one. This raises therefore the question of the use of hydraulic hammers during the second part of this operation.

De même il est possible que certains ajouts, de sable ou d'argile, viennent non pas créer un groupe d'inclusions à part, mais se mêler à la composition des autres inclusions présentes dans le matériau et modifier ou disperser les rapports, en particulier le rapport  $Al_2O_3/SiO_2$  (Dillmann *et al.*, soumis). Ce phénomène pourrait peut-être permettre d'expliquer la plus ou moins grande dispersion autour d'une droite dont font preuve certains alignements.

### Conclusion

Ce bilan des recherches menées depuis plusieurs années sur les fers de construction dans la construction monumentale médiévale, mais également à la période moderne montre tout d'abord à quel point ces édifices sont un champ d'investigation exceptionnel pour l'étude de ce matériau de la réduction du minerai à l'étape de forge. L'association des données de terrain, des analyses métallographiques et des opérations d'archéologie expérimentale permet un va-et-vient constant entre les édifices gothiques, leurs tirants et l'histoire de la métallurgie du fer.

Sur certains points l'accumulation des exemples commence à donner des résultats plus précis, notamment quant à la qualité du matériau, sa teneur en carbone, etc. Il semble en effet que l'on utilise le plus souvent un fer de qualité standard aux propriétés mécaniques vraisemblablement médiocres, mais relativement bien adapté à son emploi ; les exemples de mise en œuvre d'un matériau ayant reçu un traitement spécifique existent mais sont encore très rares. Les études futures nous confirmeront si ces barres du Palais des Papes sont une exception ou si certains chantiers commandent plus fréquemment ce genre de matériau.

En revanche, dans d'autres domaines la recherche débute et devra se nourrir des analyses et expérimentations futures. Citons tout d'abord l'évolution des procédés de réduction. Dans certains cas favorables, les analy-

ses permettent désormais d'identifier dans les cas favorables un fer issu d'une restauration contemporaine. Mais surtout, la perspective d'une cartographie de la diffusion du procédé indirect dans certaines régions de France (et même d'Europe) grâce à l'étude de la composition des inclusions, si elle peut paraître ambitieuse, n'en reste pas moins un objectif très prometteur.

Quant à l'étude de la phase d'épuration et sa relation avec l'emploi du marteau hydraulique notamment pour compacter et mettre en forme ces grands tirants de fer qui rythment nos églises, elle nécessitera davantage d'expérimentations pour établir des hypothèses plus précises. De même les analyses de ces mêmes inclusions et l'étude de leur homogénéité, de l'identification de la récupération et des types d'ajouts lors du forgeage sont des axes de recherche qu'il conviendra de développer à l'avenir.

### Bibliographie

- ARNOUX, M., 1993 - *Mineurs, férois et maîtres de forge : études sur la production du fer dans la Normandie du Moyen Age, XI<sup>e</sup>-XV<sup>e</sup> siècles*, Paris, éd. du CTHS, 646.
- ARRIBET-DEROIN, D., 2001 - *Fondre le fer en gueuses au XVI<sup>e</sup> siècle : le haut fourneau de Glinet en pays de Bray*, Thèse de doctorat d'Archéologie de l'Université de Paris I sous la direction de P. Benoit, 2 vol., 799.
- BELHOSTE, J.-F., LECHERBONNIER, Y., ARNOUX, M., ARIBET, D., AWTY, B.G., RIOULT, M., 1991 - *La métallurgie normande, XI<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècles. La révolution du haut fourneau*, Caen, l'Inventaire, 322.
- BENOIT, P., 1993 - *Les mutations techniques et scientifiques de la fin du Moyen Age et de la Renaissance*, Thèse d'Etat effectuée sous la direction de M. Serres, Université Paris I, 132-141.
- BENOIT, P., 2002 - «La marque du fer», *Les cahiers de Science et Vie*, n° 69, Sciences et techniques des bâtisseurs de cathédrales, 50-53.
- BERNARDI, Ph., DILLMANN, Ph., 2002 - «La place du métal dans la construction», dans *Monument de l'Histoire - Construire, Reconstruire le Palais des Papes, XIV<sup>e</sup> - XIX<sup>e</sup> siècles*, Vingtain (D.), éd., Avignon, Editions RMG - Palais des Papes : Avignon, 63-67.

- CHAPELOT, J., 2004** - «Le donjon et son enceinte. Une résidence royale», *Vincennes, du manoir capétien à la résidence de Charles V, Dossiers d'Archéologie n°289*, 60-73.
- DILLMANN, Ph., 1998** - *Diffraction X, Microdiffraction X et Microfluorescence X sous Rayonnement Synchrotron et analyses comparées pour la caractérisation des inclusions. Application à l'étude de l'évolution historique des procédés d'élaboration des objets ferreux (procédés direct et indirect)*, Thèse de Doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, 300.
- DILLMANN, Ph., FLUZIN, Ph., CHEVALLIER, P., 2002** - *Determination of ironmaking processes using synchrotron microprobe*, British Archaeological Reports International Series, 1043, 327-344.
- DILLMANN, Ph., BERNARDI, Ph., 2003** - «Premiers résultats métallographiques sur les tirants de fer du Palais des Papes d'Avignon. Eléments de réflexion sur la qualité et la provenance des matériaux ferreux utilisés dans la construction monumentale au Moyen Âge», *In J.-P. Sosson (éd.), Au delà de l'écrit. Les hommes et leurs vécus matériels au Moyen Âge à la lumière des sciences et des techniques. Nouvelles perspectives*. Typologie des sources du Moyen Âge occidental Hors Série, BREPOL, Louvain-la Neuve, 241-279.
- DILLMANN, Ph., BERNARDI, Ph., FLUZIN, Ph., 2003** - «Use of iron for the building of medieval monuments. The Palais des Papes in Avignon and other french buildings», *In Archaeometallurgy in Europe 1*, AIM, Milan (24-26 septembre 2003), 199-208.
- DILLMANN, Ph., ARANDA, R., L'HERITIER, M., FLUZIN, Ph., soumis** - «Forging of iron-steel artefacts: archaeology, experiments and archaeometry», *1<sup>re</sup> internationale conférence de paleosiderurgy and industrial heritage recovery. Iron, history and heritage*, 11-13 Mai 2005.
- FLUZIN, Ph., HERBACH, R., DILLMANN, Ph., 2002** - *Etudes métallurgiques et thermodynamiques des expérimentations de la forge d'AGORREGI Espagne*, La ferreria y los molinos de Agorregi-Aia, Gipuzkoa, Diputacion Foral de Gipuzkoa - European community, San Sebastian, 123-163.
- HAAS, W., 1987** - „Die Rolle des Eisens in der vorindustriellen Architektur dargestellt an ostbayerischen Beispielen“, *Die Oberpfalz ein Europäisches Eisenzentrum 1600 Jahre Grosse Hammereinung*, Amberg, Ostbayerm Bergbau und Industrie Museum, 495-504.
- JUHIN, A., 2005** - *Structure métallographique et comportement mécanique des tirants de fer du donjon du château de Vincennes*, Mémoire de M2 de Science des matériaux et nano objets (Universités Paris 6 et Paris 11) sous la direction de Ph. DILLMANN et I. GUILLOT, 129.
- KNAU, H.L., HORSTMANN, D., SÖNNECKEN, M., 1996** - «La production de fonte dans la haute vallée de la Volme : Contribution à l'étude de la sidérurgie en Westphalie occidentale» *In P. BECK (dir.), L'Innovation technique au Moyen Âge*, Actes du VI<sup>e</sup> Congrès international d'archéologie médiévale, Paris, Errances, 152-159.
- L'HERITIER, M., 2003** - *L'utilisation du fer dans la construction gothique. L'exemple de la cathédrale de Rouen*, Mémoire de DEA d'archéologie de l'Université de Paris I sous la direction de P. Benoit, 174.
- L'HERITIER, M., 2004** - «L'utilisation du fer à la cathédrale de Rouen à l'époque médiévale», *In J.-P. Watte (éd.), Haute Normandie Archéologique*, 9, CRAHN, Eu, 69-78.
- L'HERITIER, M., 2005** - *L'utilisation du fer dans les églises Saint-Ouen et Saint-Maclou de Rouen. Etude archéologique et archéométaburgie*, DFS, DRAC de la Seine-Maritime, 135.
- L'HERITIER, M., DILLMANN, Ph., BENOIT, P., 2003** - «Analyse métallographique de fers à cheval médiévaux. Mise en forme et origine du métal». *Revue d'Archéométrie*, 27, 193-206.
- L'HERITIER, M., DILLMANN, Ph., BENOIT, P., 2005** - «Premiers résultats métallographiques sur les fers de construction de la cathédrale Notre-Dame de Rouen» *In J.-P. Hervieu, G. Desire dit Gosset et E. Barre (éds.), Les arts du feu en Normandie*, Actes du 39<sup>e</sup> congrès organisé par la fédération des sociétés historiques et archéologiques de Normandie (Eu, 21-24 octobre 2004), Caen, Annales de Normandie, 287-314.
- MASSON, A., 1927** - *L'église abbatiale de Saint-Ouen de Rouen*, Paris, H. Laurens, 95.
- MAGNUSSON, G., 1985** - «Lapphyttan. An example of medieval iron production» dans *Medieval Iron in Society, 'Norberg Symposium'*, Jernkontoret, 21-57.
- PIASKOWSKI, J., 1989** - «Phosphorus in iron ore and slag and in bloomery iron», *Archaeometaterials*, vol. 3, n°1, 47-59.
- ROBIN, R., TERNON, E., 1994** - *Etude mécanique d'éléments métalliques de la cathédrale gothique de Beauvais*, UVTX de l'université de Compiègne sous la direction de Paul BENOIT.
- ROUILLARD, J., 2003** - *L'homme et la rivière : histoire du bassin de la Vienne au Moyen Âge (XI<sup>e</sup>-XVI<sup>e</sup> siècles)*, Thèse de doctorat d'histoire de l'Université de Paris I sous la direction de M. Bourrin, 5 vol., 1199.
- STEWART, J.W., CHARLES, J.A., WALLACH, E.R., 2001** - *Iron-Phosphorus-Carbon system part I - Mechanical properties of low carbon iron - phosphorus alloys*, Materials science and technology, 16, 275-282.
- TAUPIN, J.-L., 1996** - «Le fer dans les cathédrales», *Monumental*, 18-27.
- VEGA, E., DILLMANN, Ph., FLUZIN, Ph., 2002** - Contribution à l'étude du fer phosphoreux en sidérurgie ancienne, *Revue d'Archéométrie*, 26, 197-208.
- VEGA, E., DILLMANN, Ph., L'HERITIER, M., CREW, P., BENOIT, P., 2003** - «Forging of phosphoric iron. An analytical and experimental approach.» dans *Archaeometallurgy in Europe 2*, AIM, Milan, 337-346.
- VERNA, C., 2001** - *Le temps des moulins. Fer, technique et société dans les Pyrénées centrales (XIII<sup>e</sup>-XVI<sup>e</sup> siècles)*, Paris, Publications de la Sorbonne, 425.