

CONTRIBUTION A L'HISTOIRE DES TECHNIQUES ET DE L'ARMEMENT:
ESSAIS DE RESTITUTION DU FORGEAGE DE POINTES DE FLECHE
A PARTIR DE BARRES DE FER D'EPOQUE ANTIQUE¹

CONTRIBUTION TO THE HISTORY OF TECHNOLOGY AND WEAPONRY:
EXPERIMENTAL FORGING OF ARROWHEADS USING ANCIENT IRON BARS

POR

GUILLAUME RENOUX*, FRANCIS DABOSI**, PASCAL LAVAUD***

RESUME - ABSTRACT

Cette étude porte sur la recherche des conditions de forgeage optimales ayant conduit à la réalisation de pointes de flèche diverses, identiques à celles dont on dispose pour l'époque antique, parfois en grande abondance, comme cela est le cas pour le site du siège d'Uxellodunum, au Puy d'Issolud (Lot). L'expérimentation a été conduite avec le concours d'un taillandier spécialiste de la restitution d'armes anciennes. L'originalité du travail porte sur le choix du forgeage de barres archéologiques issues des épaves gisant au large des Saintes-Maries-de-la-Mer, en Méditerranée, et des fouilles du Couperé à Saint Bertrand de Comminges, dans les Pyrénées. La caractérisation métallographique préalable de ces barres nous a permis de suivre l'incidence des conditions de forgeage sur la microstructure des pointes de flèche réalisées. Les principaux faciès typologiques et microstructuraux des flèches antiques ont été reproduits, permettant ainsi d'affiner la connaissance technique du protocole de forgeage du fer, au début de notre ère.

This study is devoted to experiments for defining the forging conditions of roman iron ingots (bars); its purpose is to obtain various arrow heads similar to those issued from the famous site of *Uxellodunum* (Le Puy d'Issolud, Lot), the last fight of Caesar in Gaul. The main part of work is realized with currency bars found in loads of roman shipwrecks, in Mediterranean Sea, near Les Saintes-Maries-de-la-Mer; two smaller bars are issued from the Pyrenean site of Le Couperé, near Saint-Bertrand-de-Comminges. Effects of the various parameters of forging conditions on metal are analyzed by optical microscopy; they let to reach the different typologies and microstructural features observed with antique arrow heads.

MOTS-CLES - KEYWORDS

Paléosidéurgie antique; forgeage du fer; barres de fer; métallographie et microanalyse; pointes de flèche romaines.
Antiquity; paleosiderurgy; iron ingots; forging; metallography and microanalysis; roman arrow heads.

¹ Ce texte reprend, pour partie, le thème de l'affiche présentée par les auteurs dans le cadre du 16^{ème} Colloque GMP-CA, Archéométrie 2005, INSTN Saclay 19-22 avril 2005.

* Docteur, Associé à TRACES (UTAH), UMR 5608, Univ. Toulouse 2-Le Mirail. E-mail : guillaume.renoux0103@orange.fr.

** Professeur émérite, CIRIMAT, UMR 5085, ENSIACET, INPToulouse; associé à l'UMR 5608.

*** Taillandier; *La Bombarde*, Manoir des Tours, Rue de la Grande Fontaine, 19240 Allasac.

I. INTRODUCTION

Cette étude² s'inscrit dans le cadre d'une contribution à l'histoire des techniques, «parfois oubliée ou traitée de manière accessoire» (Rosmorduc, 1997); cette dernière doit être globale, pluridisciplinaire et intemporelle, dans le sens où elle s'applique à toutes les périodes historiques. Elle n'est pas uniquement liée aux sciences dites exactes par son approche archéométrique mais doit développer sa propre méthodologie en interaction avec l'archéologie, l'histoire politique, l'économie et la religion, selon le contexte. Quel que soit l'objet technique considéré, le savoir-faire doit s'intégrer dans les dimensions humaines, économiques et sociales de l'époque de sa réalisation. Socrate le déclarait très bien dans l'Euthydème: «nous avons besoin d'un savoir de cette sorte, un savoir qui conjugue le fait de produire et le fait de savoir se servir de ce que l'on produit» (Platon).

La disponibilité d'un type d'objet dans une période importante de l'histoire est, à l'évidence, un catalyseur indéniable des recherches à engager sur la filiation minerais-ébauche-objet (Pleiner *et al.*, 2003) et sur les protocoles de réalisation des objets.

C'est précisément ce qui est à l'origine de notre recherche des conditions mécano-thermiques du forgeage de fers antiques ayant conduit à la réalisation d'un important armement de pointes de flèche de typologies variées dont nous disposons pour l'époque antique, notamment au Puy d'Issolud (Lot) (Renoux et Dabosi, 2001; Renoux *et al.*, 2004; Renoux, 2006). Ce site a été, rappelons-le, définitivement reconnu comme étant *l'oppidum d'Uxellodunum*, lieu de la dernière bataille de César contre les tribus gauloises, en 51 a.C. (*cf.* Livre VIII, 21-44 du *Bellum Gallicum*). J.-P. Girault (1998) a pu dresser l'inventaire d'un très important mobilier d'armement; y figure notamment environ un millier de pointes de flèche découvertes à ce jour, souvent dans un excellent état de conservation (fig. 1). Nous présentons ici le bilan des résultats d'investigations reposant sur plusieurs campagnes d'essais de forgeage, engagées depuis 2003, mettant en œuvre l'examen métallographique et l'analyse physico-chimique des barres antiques et des objets forgés à partir de leur martelage, en l'occurrence des pointes de flèche de typologie antique.

Des essais sur d'autres typologies de flèches, relatives notamment à Alésia, ont également été effectués.

II. DES STRUCTURES DE REFERENCE BIEN QUALIFIEES: CONDITION D'UNE SIMULATION DE FORGEAGE SIGNIFICATIVE

Les principes de base de ce programme de restitution expérimentale du protocole de forgeage antique doivent, à l'évidence, s'inspirer **d'abord** des données archéologiques et archéométriques recueillies sur les pointes de flèche retrouvées en fouille. Les études métallographiques s'appuient sur un échantillonnage important et statistiquement représentatif de ce type d'armement dont on connaît bien les structures métallurgiques, à savoir les distributions, morphologies et compositions des phases et constituants présents (Renoux et Dabosi, 2001; Renoux *et al.*, 2004; Renoux, 2006). L'analyse approfondie des résultats obtenus vise à permettre d'imaginer et de proposer les grandes lignes des protocoles mis en œuvre par les forgerons pour réaliser ces armes, durant l'Antiquité romaine.

² Cette étude s'inscrit dans le Programme Pluriformation (PPF) *Le fer dans les Sociétés anciennes des Régions du Sud. Essai de restitution des chaînes opératoires de la paléosidéurgie méridionale par voie directe. De l'extraction à la transformation, à l'usage et au commerce*. Contrat MEN MSTP 2003-2006, renouvelé pour 2007-2010 avec l'Université Toulouse 2, en partenariat avec l'INPToulouse et l'Université Toulouse 3.

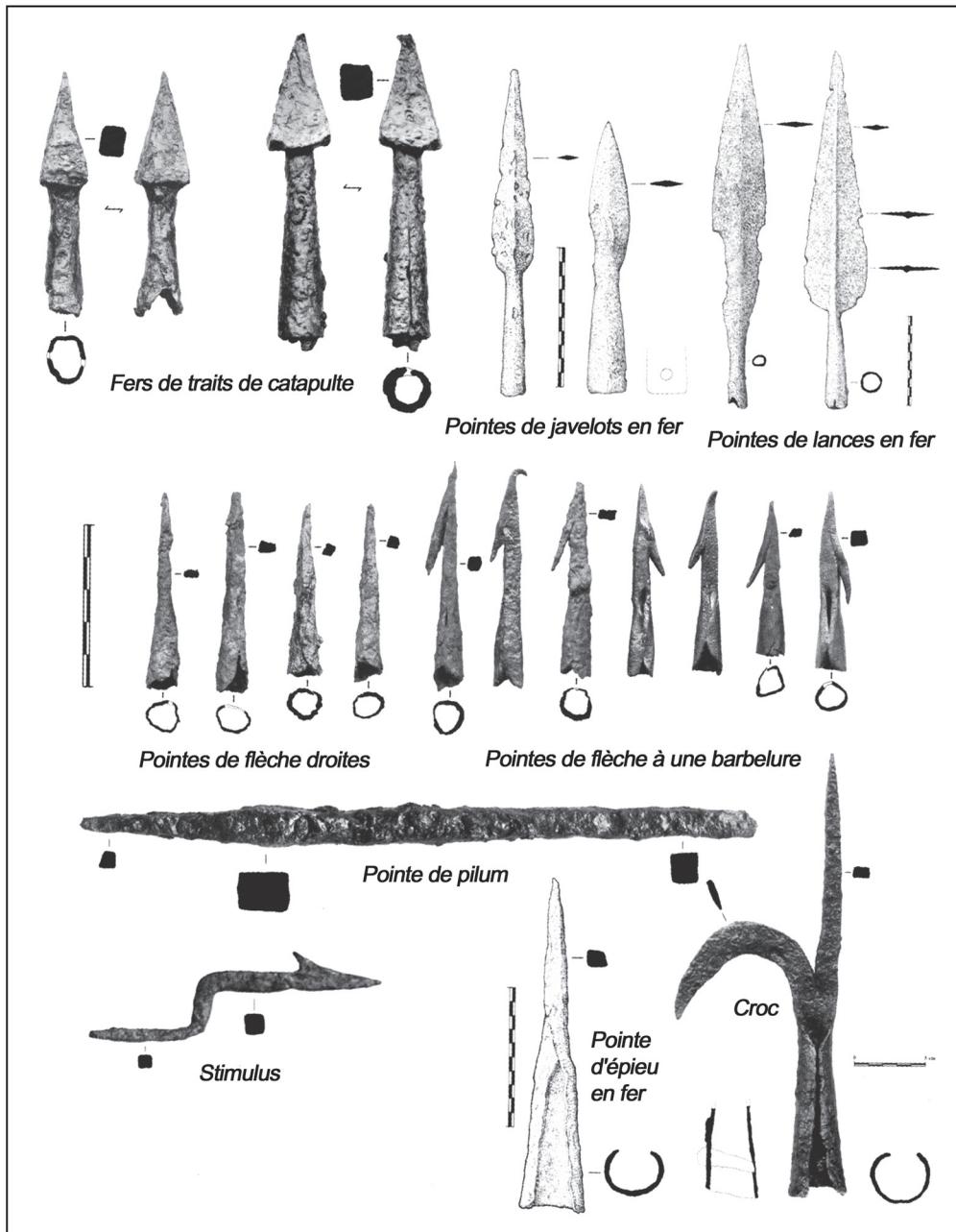


Figure 1. Armement et objets divers trouvés à la Fontaine de Loulié, Puy d'Issolud (Lot) (Girault et Billiant, 1998).

Identifier **ensuite** l'ensemble des maillons de la chaîne opératoire —de la loupe extraite de la cuve du bas fourneau à l'objet finalisé (fig. 2)— constitue un objectif certes légitime mais très ambitieux; cette démarche implique, en effet, la disponibilité sur un *même* site archéologique du plus grand nombre des témoins datés, représentatifs de chaque maillon de la chaîne de production : matières premières, éponge brute, massiot épuré par cinglage, lingots forgés et demi-produits variés (barres, bandes...), objets finis, pièces rebutées, scories et battitures,

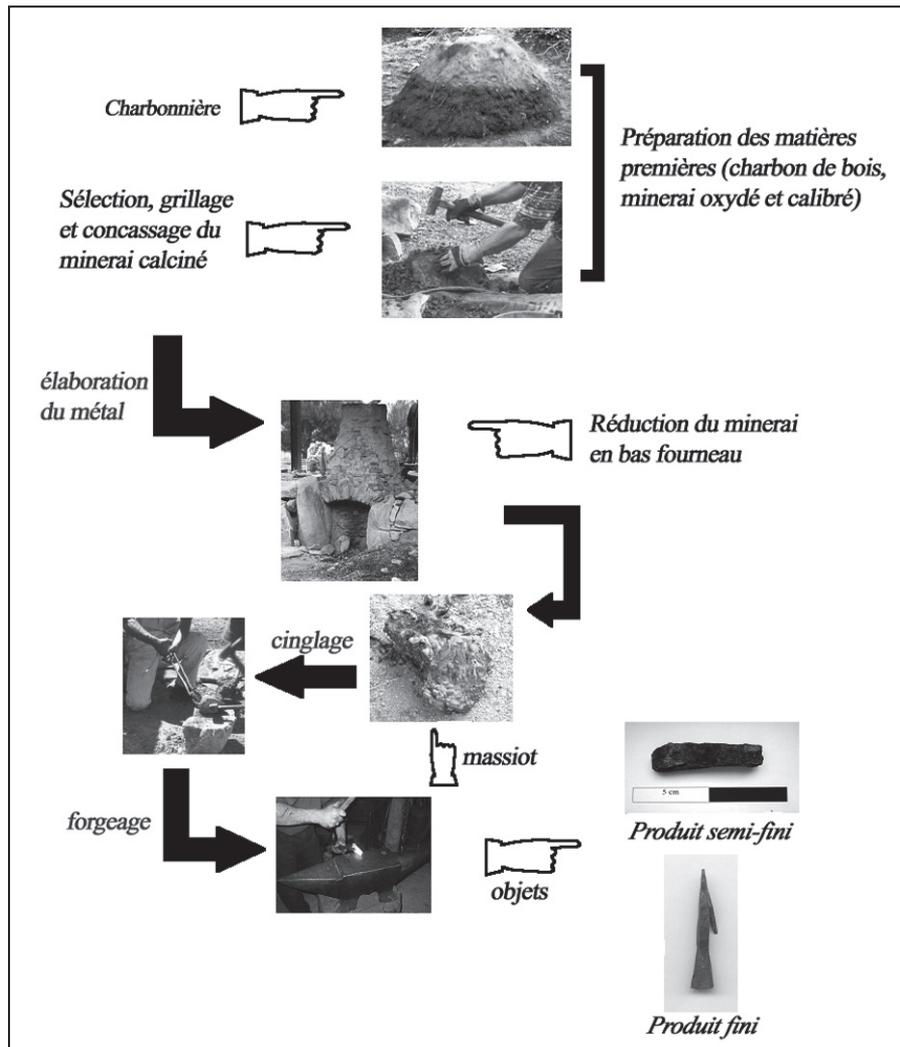


Figure 2. Schéma représentatif des différentes étapes de la chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne (réduction directe du minerai en bas fourneau) : l'exemple de la fabrication d'une pointe de flèche.

vestiges d'ateliers et de structures (bas fourneau, aire de forgeage); cette conjonction est hélas rarement observée.

Il est, en revanche, plus aisé de se concentrer sur une partie de la chaîne opératoire et de tenter, par exemple, de conduire le forgeage sur des produits intermédiaires (barres, fusoïdes), d'origine antique attestée, tels que ceux disponibles en abondance dans des épaves marines ou issus de sites de fouilles datés. Cela impose d'en effectuer, avant forgeage, la caractérisation microstructurale et analytique, selon des procédures en tous points identiques à celles adoptées pour les pointes de flèche antiques.

C'est cette dernière démarche que nous avons pris le parti de privilégier avec le concours de P. Lavaud, taillandier spécialisé dans la restitution d'armes anciennes.

Ainsi, partant de barres forgées antiques datées et sélectionnées, il s'agit de reconstituer l'étape de forgeage de la chaîne opératoire antique de réduction directe en recherchant

les conditions d'obtention des typologies et des faciès métallurgiques observés sur un type d'*artefacts* bien identifié, à savoir pour l'essentiel les pointes de flèche du Puy d'Issolud. L'expérimentation proposée est, dès lors, ancrée sur l'exploitation coordonnée et convergente des indices archéologiques, métallographiques et analytiques collectés sur la matière à forger, sur les pointes de flèche antiques prises pour référence et sur celles issues des *simulations de forgeage à l'antique*.

Cette expérimentation permet par ailleurs, comme cela a été déjà mentionné, d'apprécier la nature et le poids des contraintes techniques, d'estimer les données économiques de la faisabilité de l'objet et de formuler quelques hypothèses sur la gestion pratique d'un atelier de forgeage voué à la fabrication d'armes.

III. LES MATIERES PREMIERES RETENUES POUR L'ETUDE : DES BARRES DE FER ANTIQUES

3.1. ORIGINE DES BARRES

Le choix des barres antiques à partir desquelles ont été réalisées les pointes de flèche s'est appuyé sur deux sources de métal antique, de provenance, typologie et époque différentes (fig. 3). Il s'agit d'une part, de barres forgées issues de sept épaves marines, parmi la trentaine gisant en Méditerranée, au large des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône), repérées par le DRASSM (Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines) (Long *et al.*, 2000). Pour cette étude, nous avons puisé dans le chargement de l'épave inventoriée SM6 qui, selon L. Long, date de la deuxième moitié du I^{er} siècle avant notre ère. Les prélèvements pour forgeage (longs de 5 cm) ont été effectués dans trois tronçons de trois barres, désignés SM6-1, SM6-2 et SM6-3, dont les caractéristiques respectives sont les suivantes : 155, 210 et 200 mm pour la longueur; 31, 26 et 30 mm pour l'épaisseur; 900, 725 et 1100 g pour le poids. L'épaisseur de la couche de produits de corrosion excède rarement 1mm³.

D'une part, une autre barre, référencée SM24-03-20, a été retenue pour quelques essais complémentaires de validation des premières données.

D'autre part, de trois barreaux de dimensions plus modestes, issus des fouilles de la *domus* du Couperé, à Saint-Bertrand-de-Comminges (Haute-Garonne); inventoriés 22.03 pour l'un et 34.01 pour les deux autres, ils ont respectivement pour longueur 4,7, 8 et 6,6 cm. et pour poids 91, 160 et 76 g⁴.

3.2. CARACTÉRISTIQUES STRUCTURALES ET ANALYTIQUES

3.2.1. Généralités

L'un des caractères communs à ces fers antiques obtenus par réduction directe concerne la présence dans la matrice métallique de fins chapelets d'inclusions de scories, issues de l'élaboration du métal en bas fourneau et allongées lors du forgeage; des dendrites claires de wustite cristallisée FeO ont crû librement de façon anisotrope dans un bain qui, à sa solidifi-

³ Les poids indiqués doivent être considérés comme étant uniquement ceux des tronçons et en aucun cas comme des moyennes du poids global des barres. La corrosion tend à entraîner une augmentation du poids originel, par suite de la formation d'oxydes de fer, et doit de ce fait être prise en compte dans les valeurs moyennes affichées.

⁴ Ces trois barreaux nous ont été donnés par le responsable des fouilles du Couperé, le Pr. R. Sablayrolles, que nous remercions vivement.

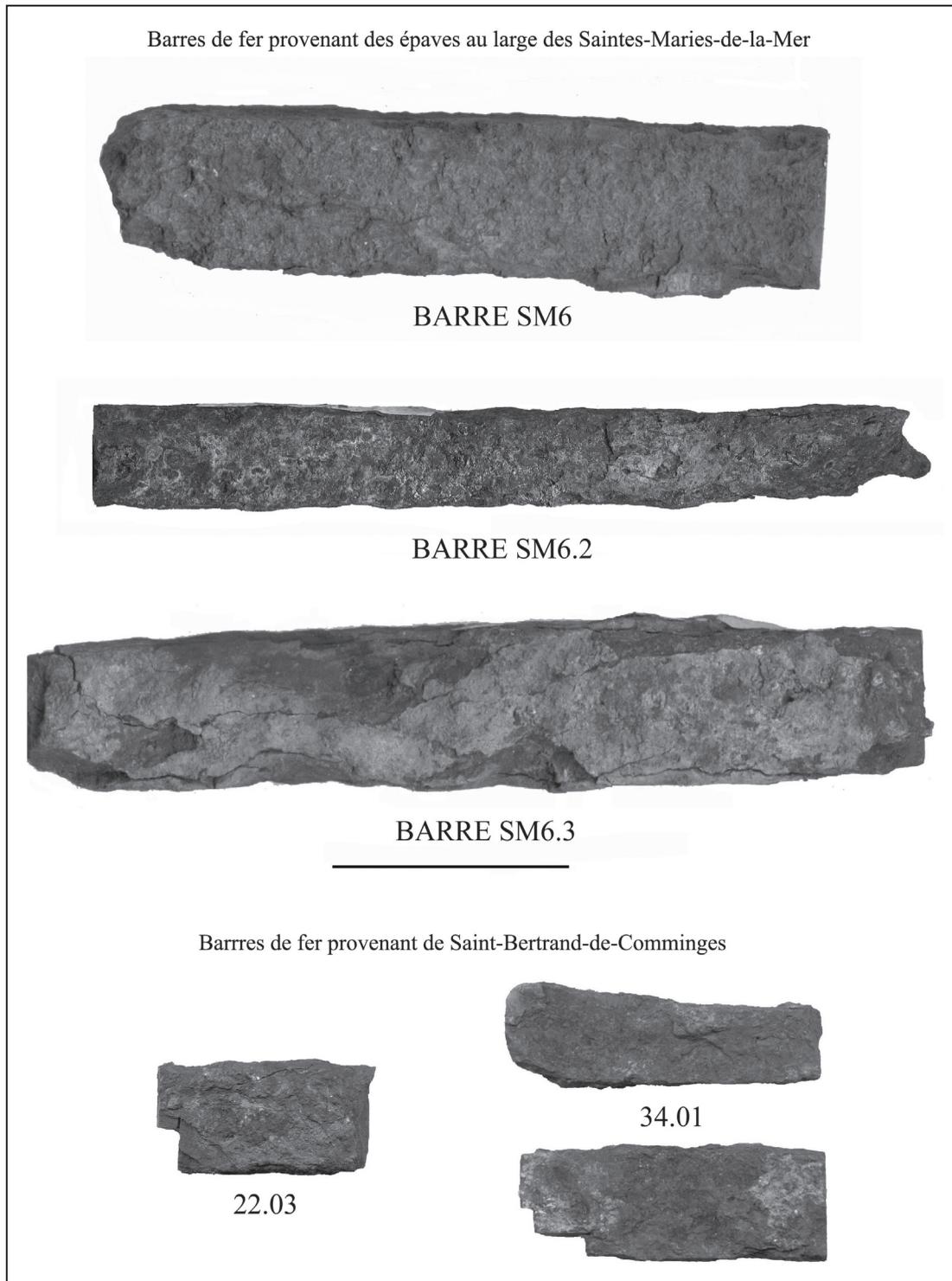


Figure 3. Les deux types de barres archéologiques utilisées pour la restitution du forgeage à l'antique des pointes de flèche.

cation, s'est scindé en un réseau caractéristique de cristaux de fayalite SiO_4Fe_2 , plus ou moins substituée, noyés dans une phase vitreuse résiduelle plus complexe. Quelques scories filiformes vitreuses (généralement constituées de silice SiO_2) sont parfois observées; elles sont associées aux adjuvants (sable ou argile) projetés sur la pièce à forger pour en éviter l'oxydation lors du forgeage à chaud et incomplètement éliminés parfois en fin de forgeage.

La matrice métallique est rarement homogène dans son ensemble, évoluant d'un fer doux (ferrite) quasiment dépourvu de carbone ou seulement décoré sur ses joints de grain de quelques précipités épars de cémentite Fe_3C , à un acier dont le faciès ferrito-perlitique correspond à une teneur en carbone généralement voisine de 0,5% poids mais pouvant localement s'élever à 0,8-0,9% poids (aciers respectivement hypo- et eutectoïdes).

Il est fortement suggéré de se reporter au diagramme de phases classique du système binaire Fe-C (Fluzin *et al* 2004), représentatif de la quasi-totalité des matériaux ferreux de l'antiquité, à l'exception des météorites (riches en nickel et cobalt), pour y reconnaître les domaines de stabilité des phases citées précédemment. Les microstructures les plus typiques sont notamment répertoriées dans la thèse de G. Renoux (Renoux, 2006).

Ces informations microstructurales et microanalytiques sont accessibles par la mise en œuvre de divers moyens métallographiques optiques, électroniques et ioniques. Seules sont présentées ici les micrographies optiques réalisées sur des prélèvements soumis aux procédures de préparation habituelles : polissage aux papiers abrasifs au carbure de silicium jusqu'au grade 4000 suivi d'attaque au réactif *nital* (solution alcoolique d'acide nitrique, 2 à 4%).

Examinons de façon plus précise les microstructures observées sur les deux types de barres retenues pour les essais de forgeage.

3.2.2. Les barres de fer des Saintes-Maries-de-la-Mer

Les différentes barres disponibles offrent, en général, un bon état de conservation, les couches de produits de corrosion n'excédant pas un à quelques millimètres d'épaisseur, exceptionnellement. Le métal apparaît très hétérogène. A une structure ferritique à très faible teneur en carbone, observable sur certaines plages, s'oppose fréquemment des faciès ferrito-perlitique et de type Widmanstätten, représentatifs d'un métal beaucoup plus carburé. Les micrographies suivantes (fig. 4 et 5) proposent un échantillonnage caractéristique des diverses structures rencontrées. La barre SM24-03-20, de structure ferritique, est constituée de cristaux équiaxes d'un fer très doux, comme en témoigne la quasi-absence de précipités de cémentite

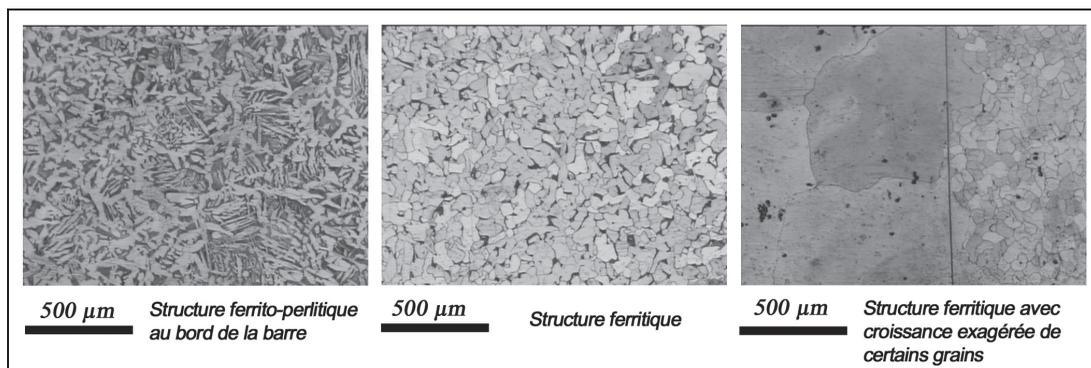


Figure 4. Types de microstructures observés sur la barre SM6 (épave des Saintes-Maries-de-la-Mer); attaque au réactif *nital* à 2%.

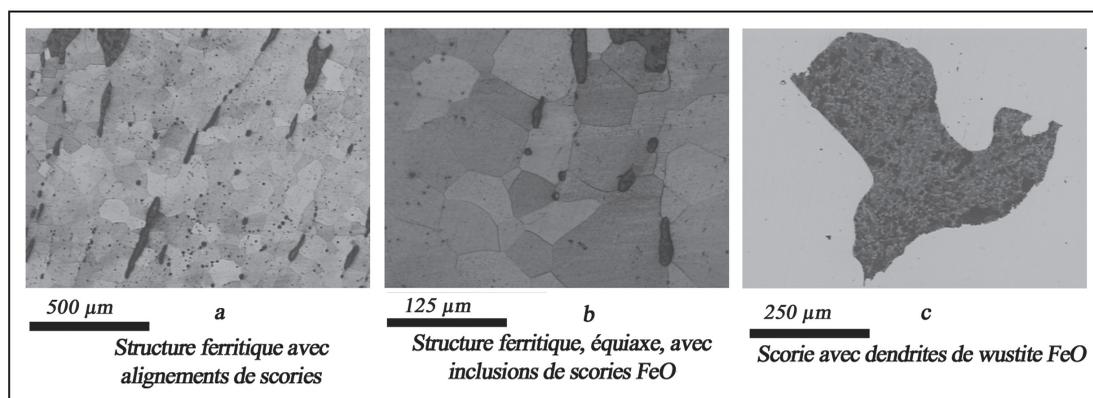


Figure 5. Types de microstructures observés sur la barre SM24-03-21 (épave des Saintes-Maries-de-la-Mer); attaque au réactif *nital* à 2%.

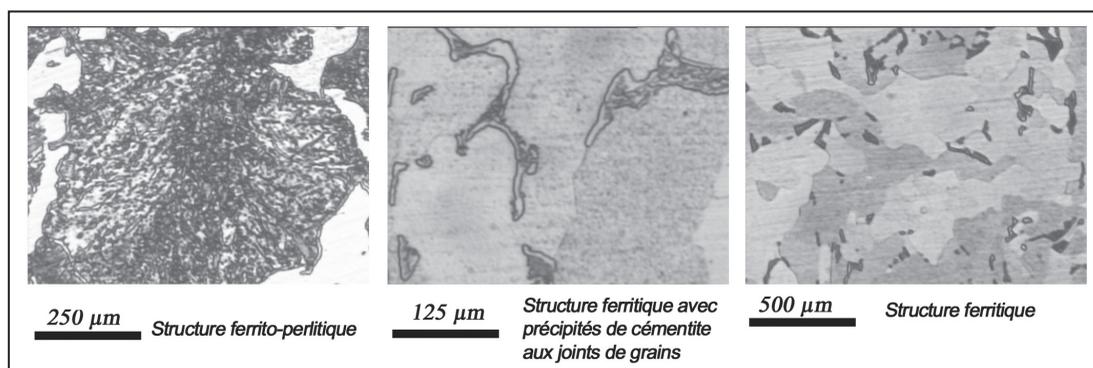


Figure 6. Types de microstructures observés sur la barre SBC 34-01-1 (fouilles du Couperé, Saint-Bertrand-de-Comminges); attaque au réactif *nital* à 2%.

dans les joints intergranulaires. Les micro-inclusions de scories, constituées de dendrites de wustite noyées dans la fayalite, sont, en revanche, assez nombreuses.

Des mesures de microdureté Vickers H_v sous faible charge (50 g) permettent d'évaluer les niveaux de résistance mécanique à la déformation du matériau; les valeurs sont comprises entre 90 et 125 sur les plages de ferrite et entre 135 et 155 sur les plages d'acier hypoeutectoïde, associant la ferrite primaire aux colonies de perlite.

3.2.3. Les barres de fer du Couperé

Les prélèvements effectués sur ces barreaux de dimensions beaucoup plus modestes révèlent ici encore une grande disparité du degré de carburation du métal, selon la zone examinée. On retrouve, notamment sur la barre 34-01.2, les structures typiques d'un fer doux à très faible teneur en carbone, quelques précipités fins de cémentite Fe_3C décorant les joints de grains de la matrice ferritique (fig. 7). Le barreau 34-01.1 apparaît, en revanche, plus chargé en carbone, avec une teneur estimée à 0,5% poids; le faciès ferrito-perlitique se compose de plages claires de ferrite primaire et de plages plus sombres de perlite (fig. 6); il cède parfois la place à une structure de Widmanstätten dont la ferrite apparaît aciculaire dans le plan de coupe de l'échantillon (fig. 8).

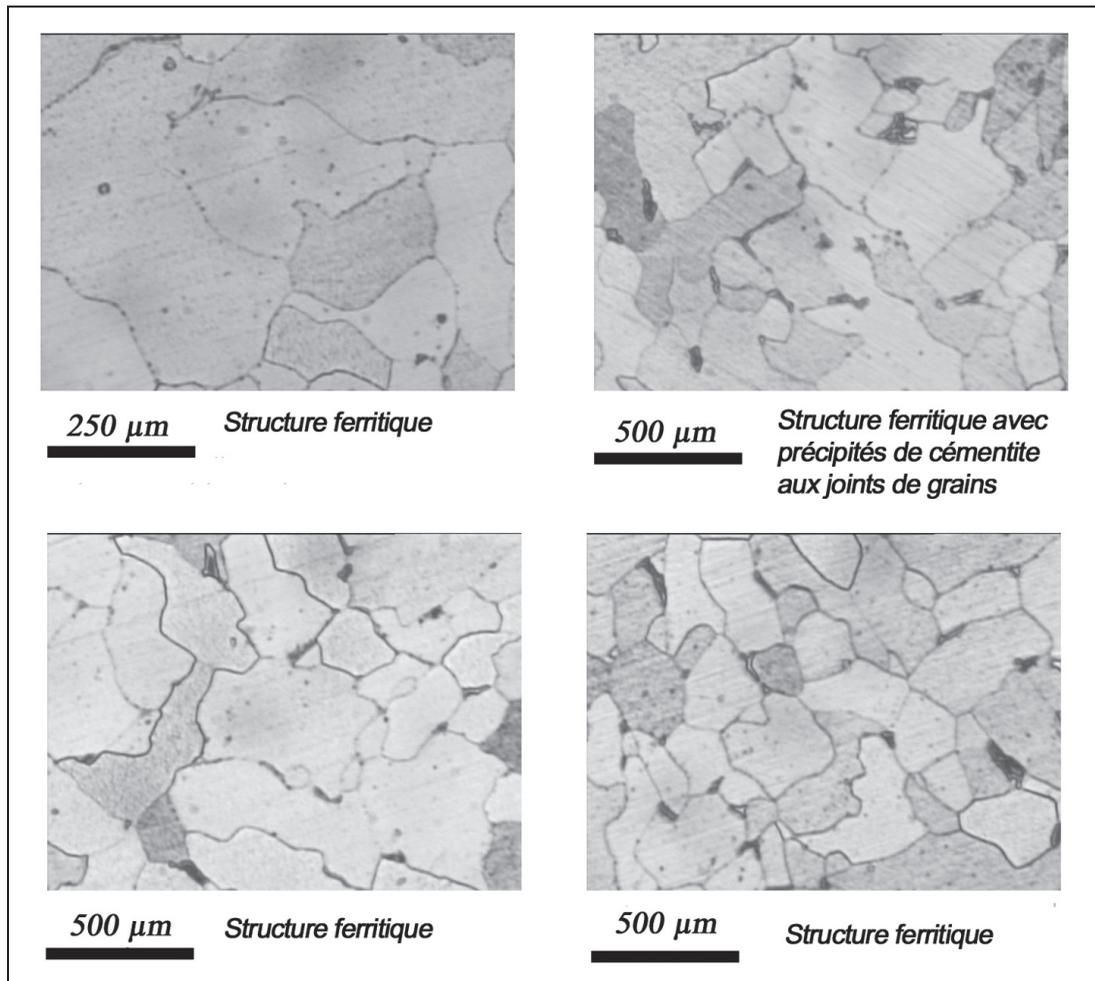


Figure 7. Types de microstructures observés sur la barre SBC 34-01-2 (fouilles du Couperé, Saint-Bertrand-de-Comminges) ; attaque au *nital* à 2%.

L'étude métallographique a été complétée par des mesures de microdureté Vickers Hv. Les résultats obtenus traduisent une assez bonne homogénéité de comportement pour les zones ferritiques, avec des valeurs de Hv comprises entre 93 et 123, la moyenne s'établissant à 105; sur les plages ferrito-perlitiques, plus carburées, la valeur maximale atteint 201, ce qui globalement caractérise un fer relativement doux, comme cela a été montré sur des barres d'autre provenance (Dieudonné-Glad *et al* 2001).

IV. BUT A ATTEINDRE : REALISER DES POINTES DE FLECHE DE STRUCTURE IDENTIQUE A CELLE DES PIECES ANTIQUES

Les principales microstructures des pointes de flèche antiques, décrites par ailleurs (Renoux et Dabosi, 2001; Renoux *et al.*, 2004; Renoux, 2006), sont brièvement rappelées avec les quelques micrographies suivantes (fig. 9): structure ferritique équiaxe, structure de Widmannstätten, structure ferrito-perlitique usuelle; une structure ferrito-perlitique mérite une attention

particulière : c'est celle incluant un liseré clair, adjacent aux deux surfaces carburées, caractéristique du soudage partiel d'une barbelure sur l'extrémité d'une pointe de flèche; les structures peu carburées, à l'extérieur de la zone de soudure, correspondent au métal du cœur de la barbelure et du corps de la flèche.

V. L'OUTILLAGE DE BASE DU TAILLANDIER

La fabrication des armes nécessite une grande variété d'outils, chacun étant adapté à un usage précis. La production de pointes de flèche n'échappe pas à cette règle. Dans cette étude, le taillandier a eu recours à quatre types d'outil: *fixe*, comme l'enclume dont la figure 10a précise les composantes; de *frappe*: le marteau; de *maintien*: des pinces et des tenailles; de *tranchant*: le tranchet. La figure 10b (Doswald *et al.*, 1997) —tout comme de nombreux documents iconographiques— évoque de façon exhaustive la multitude des outils dont dispose le forgeron dans son atelier. Il apparaît que cet artisan en possédait la panoplie dès l'époque gallo-romaine (Duval, 1952; Reddé, 1978; Guillaumet, 1998), sans évolution notable depuis, comme le souligne par exemple J. Dechelette (1927).

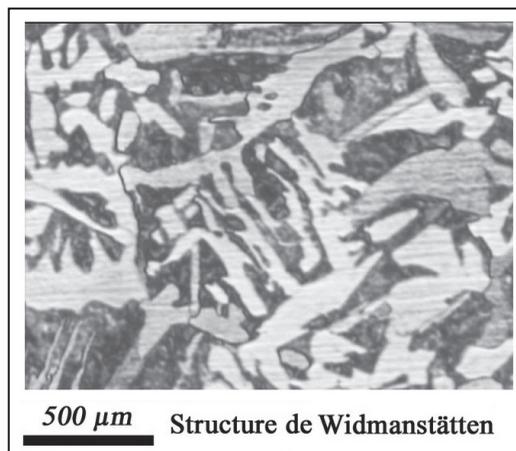


Figure 8. Structure de type Widmanstätten observée sur la barre SBC 34-01-1 (fouilles du Coupéré, Saint-Bertrand-de-Comminges); attaque au nital à 2%.

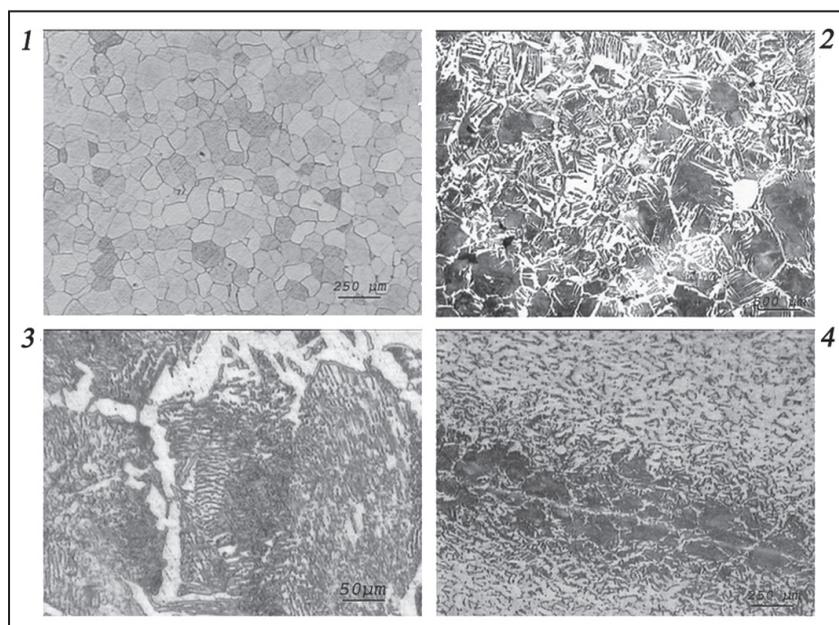


Figure 9. Types de microstructures les plus fréquemment observés sur les pointes de flèche antiques, du Puy d'Issolud notamment.

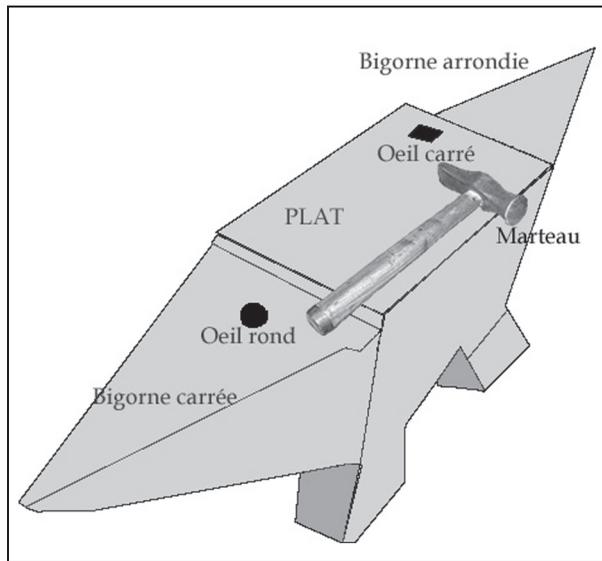


Figure 10a. Principales composantes d'une enclume de forgeron.

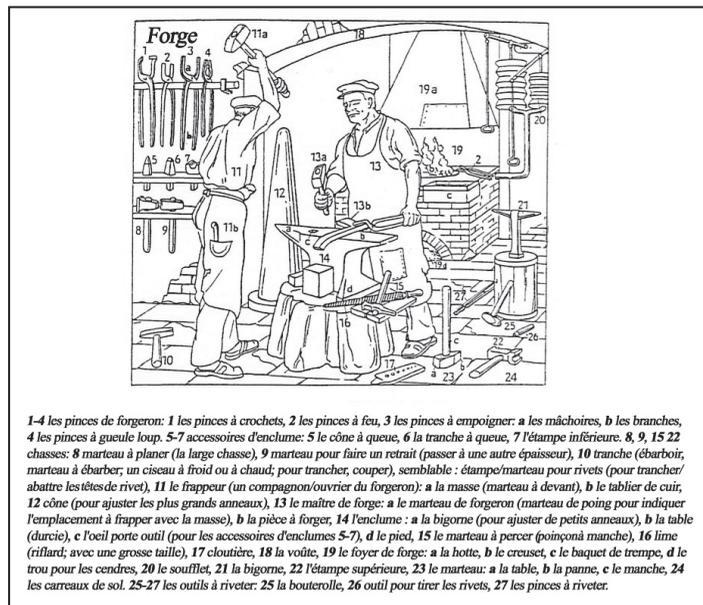


Figure 10b. Atelier de forge et sa panoplie d'outils (Doswald *et al.*, 1997).

Dans nos propres essais, nous nous sommes toujours attachés à utiliser les mêmes outils, évitant ainsi d'introduire d'éventuelles modifications microstructurales liées à l'usage d'instruments de forgeage différents.

VI. LES ETAPES DE LA FABRICATION D'UNE POINTE DE FLECHE

Les réflexions menées sur les typologies de ce type de mobilier militaire antique et quelques essais d'orientation nous ont conduits à préciser les éléments du protocole de réalisation.

6.1. REDUCTION DE SECTION DE LA BARRE INITIALE

La procédure retenue est la suivante :

- Prélèvement d'un tronçon de barre, long de quelques centimètres. Un brossage vigoureux est nécessaire pour éliminer mécaniquement l'essentiel des produits de corrosion formés durant l'enfouissement terrestre ou, *a fortiori*, durant l'immersion marine. On évite ainsi les dégagements gazeux intempestifs, nauséabonds et nocifs qui ne manqueraient pas de se produire lors du forgeage ultérieur.
- Soudage direct, sur une barre de fer ordinaire, du tronçon trop court pour être tenu avec les pinces habituelles lors de sa manipulation.
- Préchauffage vers 800°C du tronçon de barre nettoyé, puis étirage manuel (au marteau) ou automatique (au petit pilon). On observe, à ce stade, la remarquable malléabilité des fers issus des deux origines pré-citées. Aucune crique ne se développe, même pour les allongements les plus élevés (de l'ordre de 1000%). Des chauffes intermédiaires entre passes de forgeage sont pratiquées. L'homogénéité thermique est jugée excellente par le taillandier. Des mesures de conductivité thermique sur ces fers anciens sont envisagées pour tenter de justifier ces impressions d'une façon plus scientifique; les barres du Couperé, de trop petite taille, ont été directement forgées après brossage.
- Prélèvement de quelques centimètres de la barre étirée, longue de 50 cm, de section sensiblement quadrangulaire d'un cm².

6.2. PHASES DE RÉALISATION DE LA POINTE DE FLÈCHE

Des réchauffages intermédiaires sont associés à chacune des phases suivantes (fig. 11) :

- Tête aplatie en trois étapes de forgeage pour réaliser une sorte de plat triangulaire permettant de façonner la douille;
- roulage à l'enclume, en une étape, de la douille, coupée ensuite au tranchet;
- frappe pour façonnage de la pointe à quatre faces;
- pliage à chaud éventuel de la pointe, pour la réalisation d'une barbelure;
- frappe finale latérale, vers 650-700 °C, pour améliorer l'élasticité de la barbelure.

Quelques variantes dans cette procédure standard nous ont permis de réaliser les diverses typologies de flèche à partir des barres archéologiques.

6.3. CHOIX DES CONDITIONS DE FORGEAGE DES POINTES DE FLÈCHE

Les principaux faciès microstructuraux rencontrés sur les pointes de flèche antiques permettent de proposer quelques pistes majeures pour le choix des matières premières et des paramètres du forgeage, donc des conditions d'essai, comme le schématise la figure 12 :

- *nature du combustible* : il s'agit de charbons de bois durs à haute densité (chêne et hêtre, essentiellement), associés à la chaîne de réduction directe; quelques essais comparatifs sont effectués avec de l'antracite (en totalité ou partiellement);
- *température et durée des réchauffages intermédiaires*: les effets de ces facteurs —en partie indissociables du choix du combustible— sont complexes; en effet, ils agissent tout à la fois sur le caractère carburant ou réducteur du milieu et sur l'état métallurgique à chaud de la pièce traitée. C'est ainsi que l'antracite se révèle moins carburigène que le charbon de bois pour le métal;

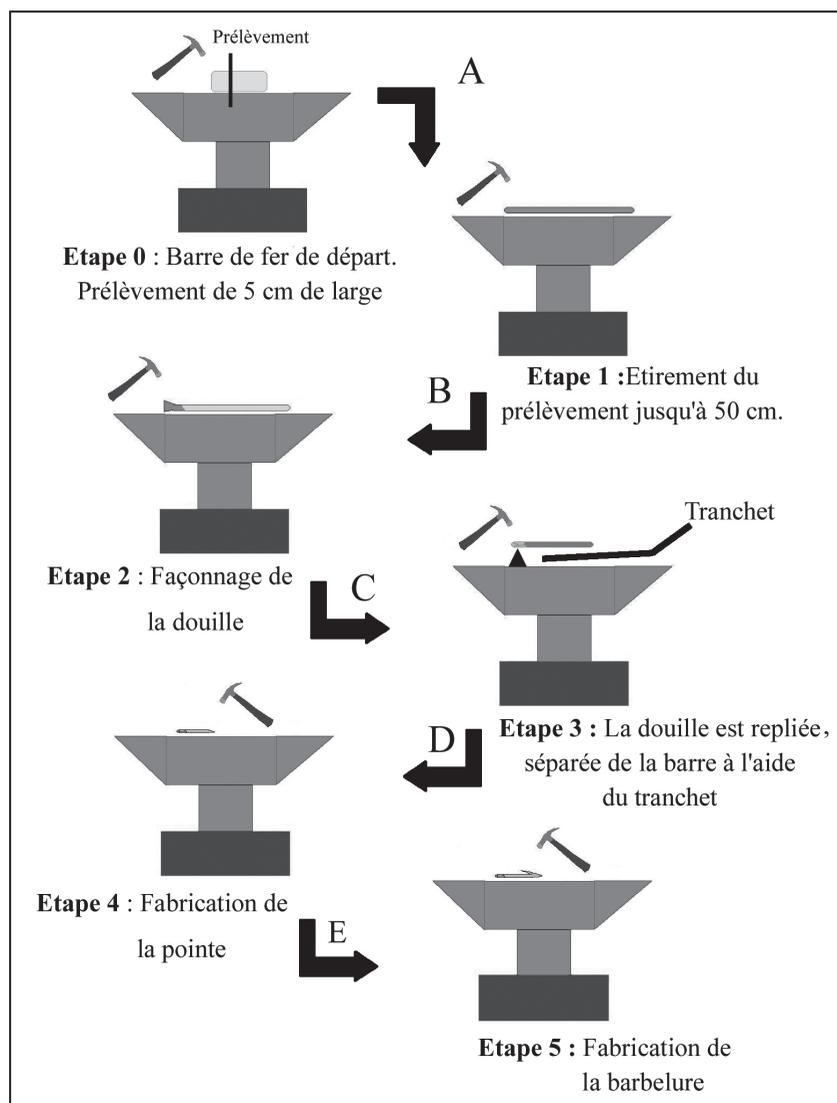


Figure 11. Les étapes de réalisation d'une pointe de flèche. A à E traitements thermiques intermédiaires.

- *vitesse du refroidissement final* : elle peut être très lente (sous la cendre), lente (abandon à l'air libre), moyennement lente (agitation dans l'air), assez rapide (bain d'argile), très rapide (trempe à l'eau froide) ou encore étagée (avec palier intermédiaire dans un bain d'huile ou de sel). La trempe à l'eau froide permet d'obtenir une structure hors d'équilibre très dure (la martensite); la trempe en bain d'argile apparaît plus sélective : la création d'un mince écran d'argile à la surface du métal rougi permet d'atténuer les effets de caléfaction liés à la vaporisation brutale de l'eau; on réalise alors un meilleur compromis entre dureté et malléabilité du métal. Un protocole particulier impliquant un refroidissement rapide entre 1000-1100°C et 500-600°C suivi d'un refroidissement libre à l'air est expérimenté pour tenter d'obtenir la structure de Widmanstätten, si fréquente dans les observations d'objets ferreux antiques;

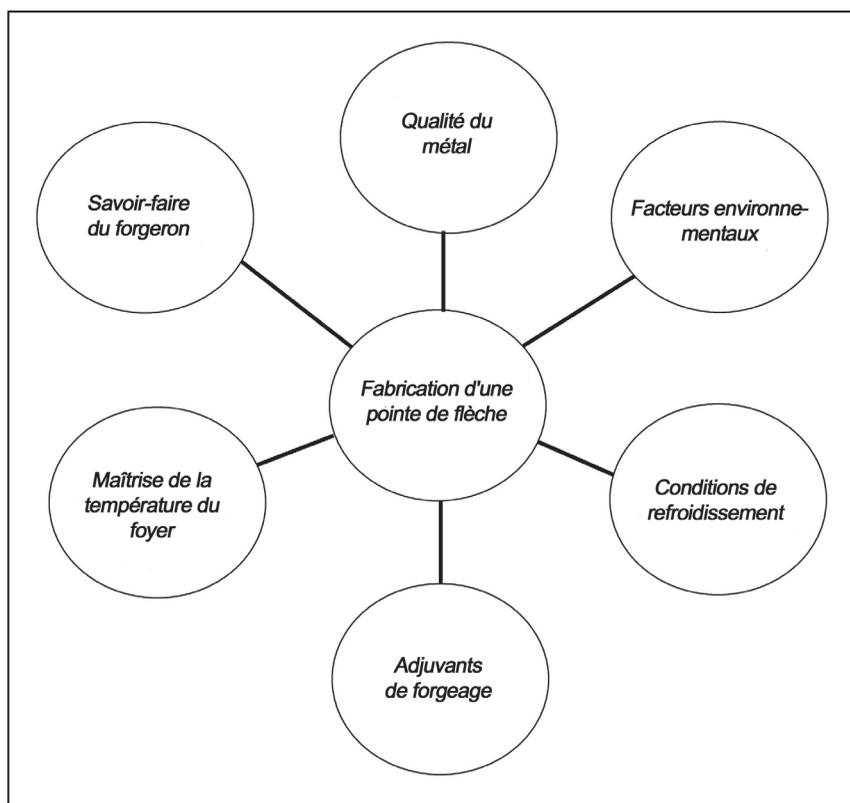


Figure 12. Diagramme schématisant les facteurs essentiels entrant en jeu dans la réalisation d'une pointe de flèche.

- *adjuvants anti-oxydants* (sable, argile fine ou poudre de scories, selon les cas) dont l'efficacité est avérée vis-à-vis d'une limitation de la perte au feu par oxydation du métal en cours de forgeage à chaud; un film vitreux de silicate protège en effet la surface du métal;
- *cémentation*: carburation superficielle favorisant le durcissement par trempe de la surface aciérée du métal;
- *soudure d'une barbelure*: cette opération implique un parcours thermique particulier avec incursion contrôlée et brève autour de 1300°C, en évitant de brûler le métal.

VII. PRINCIPAUX TYPES DE PROCEDURES DE FORGEAGE EXPERIMENTEES

Afin de ne pas alourdir la présentation des essais réalisés, les conditions détaillées sont énoncées sous forme des tableaux A à F (en Annexe 1). On y retrouve notamment, pour chaque nouvel essai, la désignation des modifications spécifiques apportées, une à une, aux valeurs des paramètres explicités dans le chapitre précédent.

Avec les barreaux antiques étirés, nous avons délibérément cherché à provoquer, à partir de quelques essais *standardisés*, des dérives contrôlées de points précis de la procédure pour tenter d'en apprécier les effets spécifiques sur la qualité de l'objet final.

Quelques essais préliminaires d'orientation (tableau A) ont mis en œuvre une barre à béton (acier à 0,35 %C; diamètre 0,8 cm). La plus grande partie des essais a, bien entendu, été conduite sur les barres des Saintes-Maries-de-la-Mer (tableaux B, D, E et F), compte tenu de l'importance du stock disponible. Une seule série d'essais a été effectuée avec un barreau du lot de Saint-Bertrand-de-Comminges (tableau C).

On s'est également attaché à réaliser d'autres types de pointes de flèche retrouvées non seulement au Puy d'Issolud mais aussi à Alésia. Les reliquats des tronçons de barres de Saint-Bertrand-de-Comminges et des Saintes-Maries-de-la-Mer, pre-forgés au marteau-pilon, ont été exploités à cette fin. Les essais correspondants sont décrits dans le tableau E. Les essais désignés 2, 3, 8 et 9 n'ont pas conduit aux résultats escomptés, ce qui a mis l'accent sur le rôle d'un autre paramètre : l'influence du foyer de forgeage et de son environnement. Les séries d'essais antérieures (tableaux A à D) avaient été réalisées dans un foyer de forge culotté que les braises et les cendres avaient, au cours du temps, tapissé d'une couche relativement épaisse. En revanche, le foyer fraîchement rénové avant les essais de la série E modifie l'environnement thermique de l'objet en cours de réalisation. Dans un foyer culotté, les cendres assurent une certaine régulation de la température, en réduisant les pertes de l'air chaud hors du foyer; le forgeron contrôle mieux la température du travail et limite l'amplitude des écarts à chaque passage de l'objet au feu. En outre, certains constituants minéraux (silice, potasse) de ces cendres de charbon de bois améliorent leur rôle favorable d'antioxydant. Cela a induit une nouvelle campagne d'essais (tableau F), avec le métal d'une autre barre de fer d'une épave des Saintes-Maries-de-la-Mer, référencée SM24-03-20.

VIII. RESULTATS DES DIVERS TYPES D'ESSAI DE FORGEAGE

Il se dégage de l'ensemble des constatations faites durant les essais et des résultats d'examen métallographiques sur les pointes réalisées tout à la fois un faisceau de conclusions très positives et un lot de questions sans réponse, pour une large part liées à la méconnaissance actuelle de l'organisation du travail autour de la forge antique.

8.1. DES CONCLUSIONS DÉJÀ BIEN ÉTABLIES

8.1.1. *Typologie des pointes de flèche.*

Les pointes de flèche de diverses typologies sont aisément réalisables en un nombre limité d'opérations élémentaires, comme l'illustre avec les figures 13 à 15 un échantillonnage des divers types obtenus dans cette étude : pointes à barbelure, pointe losangique foliacée ou à nervures sur une ou deux faces (Renoux, 2006: 96-118; Duval, 1970).

A la différence des pointes de flèche du Puy d'Issolud, certaines d'entre elles — issues d'Alésia — sont usinées; elles nécessitent un coup de burin, donc une durée plus longue pour leur réalisation. Un martelage final permet de parfaire la tête. En ce qui concerne ce type de pointe de flèche, au vu des études métallographiques, nous n'avons pas actuellement d'interprétation claire sur la zone de carburation centrale qui délimite, selon nous, la soudure entre le corps de la flèche et l'aileron.

Les pointes à tête losangique sont réalisées à l'issue de plusieurs frappes successives sur les quatre côtés de la tête (fig. 16); la nervure centrale se fait tout naturellement.

Pour l'obtention de la tête foliacée, le forgeage est effectué sur les facettes opposées de la pointe que l'on fait pivoter chaque fois.

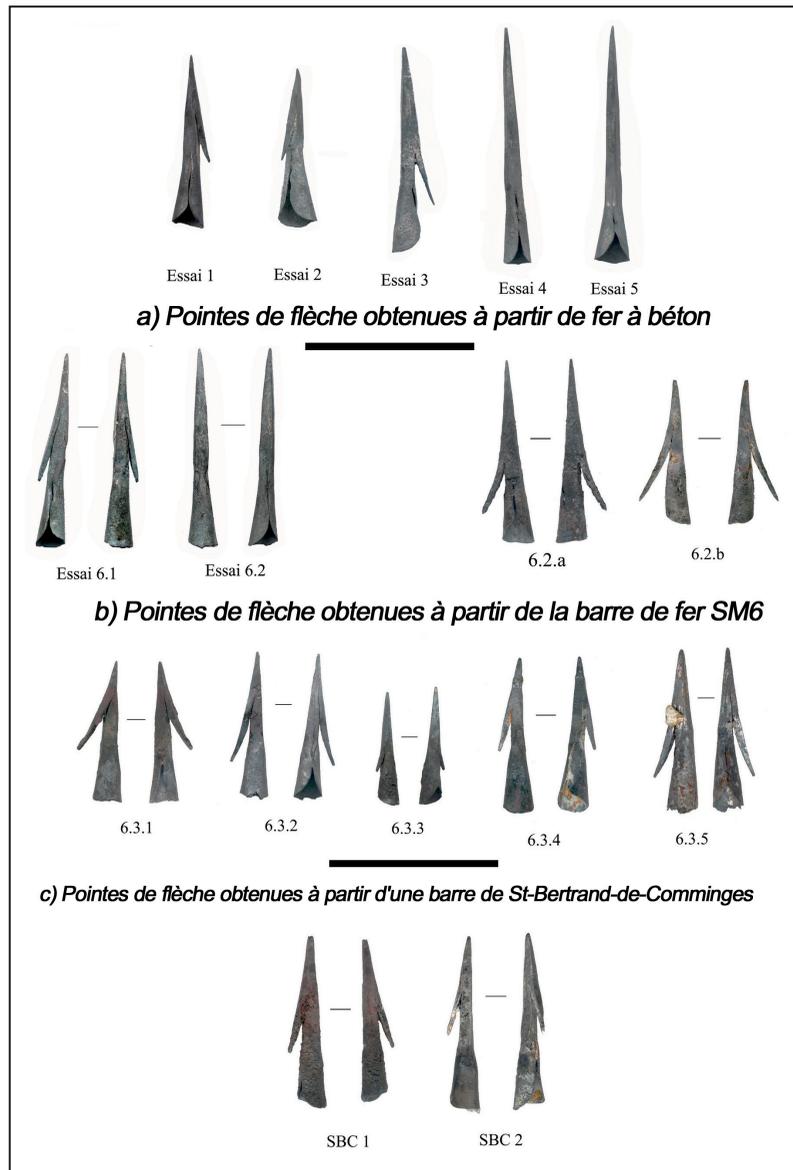


Figure 13. Pointes de flèche obtenues à partir du fer à béton (moderne) (a) et des barres de fer archéologiques des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer (SM) (b) et des fouilles du Couperé (SBC) (c). Se référer aux tableaux de l'Annexe 1 pour les conditions des essais.

8.1.2. Microstructures.

La plupart des états structuraux recherchés sont généralement obtenus selon des modalités à la fois spécifiques et reproductibles, comme en témoignent les exemples suivants (fig. 17 et 18) à rapprocher des microstructures déjà évoquées sur les pointes de flèches antiques (fig. 9). L'étude métallographique a permis de montrer que le régime de refroidissement le mieux adapté à l'obtention des microstructures visualisées sur les armes d'*Uxellodunum* mettait en

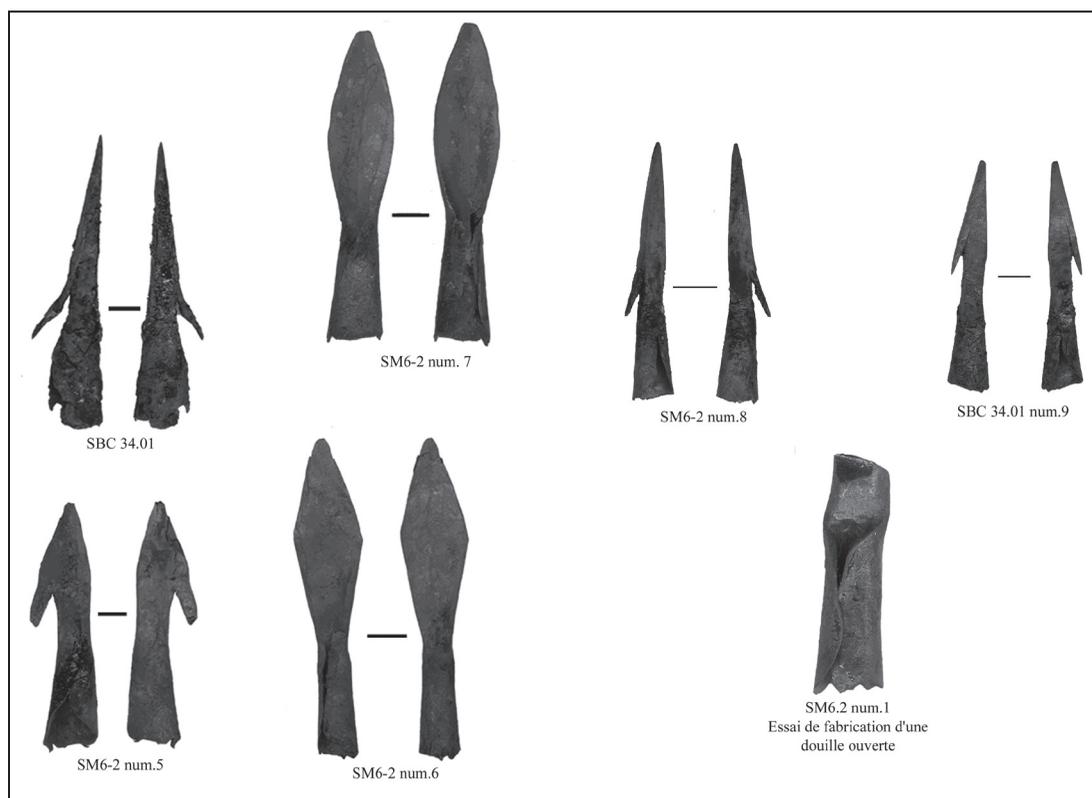


Figure 14. Diverses typologies de pointes de flèche forgées à partir des barres de fer antiques.

jeu une agitation vigoureuse à l'air ambiant de l'objet préalablement forgé à haute température, autour de 1000 à 1100 °C. Le refroidissement en bain d'argile ou à l'eau froide se révèle beaucoup trop brutal; les structures obtenues, typiques de structures de trempe (bainite, martensite), ne se rencontrent pas avec les pointes de flèche du Puy d'Issolud. Les refroidissements sous la cendre ou par abandon à l'air calme sont, en revanche, trop lents, ne conduisant pas à un effet durcissant sensible.

La qualité des barres antiques initiales est déterminante dans le déroulement du forgeage; ainsi, les barres du Couperé, beaucoup plus petites que celles extraites des épaves marines, se forgent aisément à cœur, même dans les essais avec adjuvants anti-oxydants (sable). La qualité du métal joue un grand rôle dans le déroulement du forgeage. Avec un fer peu dense, poreux, fissuré et riche en inclusions résiduelles de scories, le martelage accentue le risque de développement de criques rédhibitoires (Crew, 1993), comme nous l'avons nous-mêmes constaté pour certains essais. Ainsi, le *fibrage*, identifié sur l'une des barres partiellement délitée des Saintes-Maries-de-la-Mer (barre SM-6) initie le feuilletage de la tête et la fissuration de la douille, aux forts taux de corroyage.

On retrouve, déformés par le forgeage, les mêmes types de *scories résiduelles de réduction* que ceux identifiés dans les barres de départ (et dans les massiots de réduction directe, caractérisés dans d'autres études) : dendrites de wustite dans une matrice majoritairement constituée de fayalite. La preuve est ainsi fournie de la pérennité de ces scories dans la chaîne opératoire, de la réduction du minerai en bas fourneau jusqu'à l'étape de mise en forme de l'objet final. Il

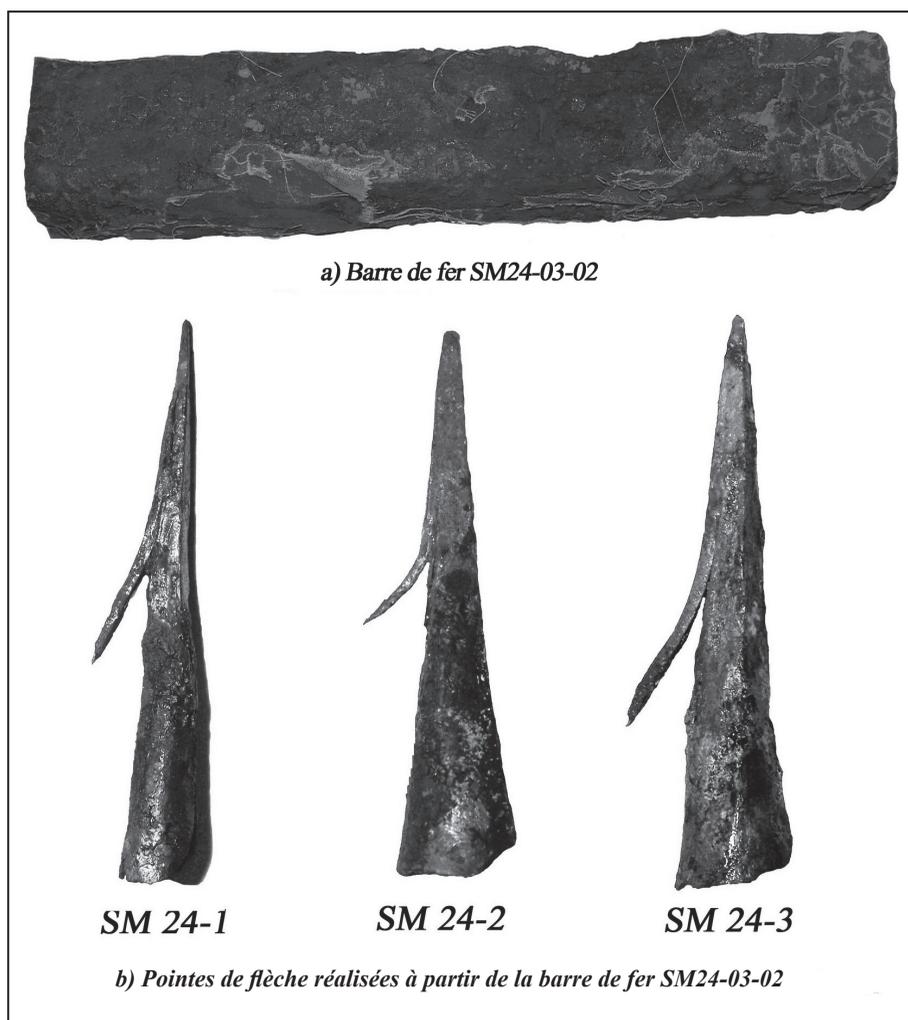


Figure 15. Barre de fer SM24-03-02 des Saintes-Maries-de-la-Mer et pointes de flèche obtenues lors de son forgeage (expérimentation considérée comme la plus aboutie).

s'agit d'une observation importante vis-à-vis du concept de traçabilité associé à la restitution des chaînes opératoires.

Aucune trace de scorie de forgeage -généralement de type vitreux sur les fers forgés anciens- n'a été observée sur les plages examinées à l'issue des essais avec adjuvants anti-oxydants. Le film vitreux demeure en surface et se trouve totalement éliminé dans les derniers instants du forgeage.

En ce qui concerne le *choix du combustible*, le charbon de bois sélectionné —constitué d'un mélange de bois de hêtre, chêne et frêne- se révèle, toutes choses égales par ailleurs, plus carburant que l'antracite.

L'obtention d'une soudure- à laquelle est très fréquemment associé un *liseré clair* sur les micrographies réalisées sur les fers antiques- n'est pas toujours aisée; plusieurs chauffes à des températures très élevées (de l'ordre de 1200 à 1300°C) peuvent être nécessaires pour souder convenablement l'ardillon sur la pointe de la flèche. Les résultats les plus probants sur l'observation du liseré clair ont été obtenus lors de la dernière série d'essais (tableau F).

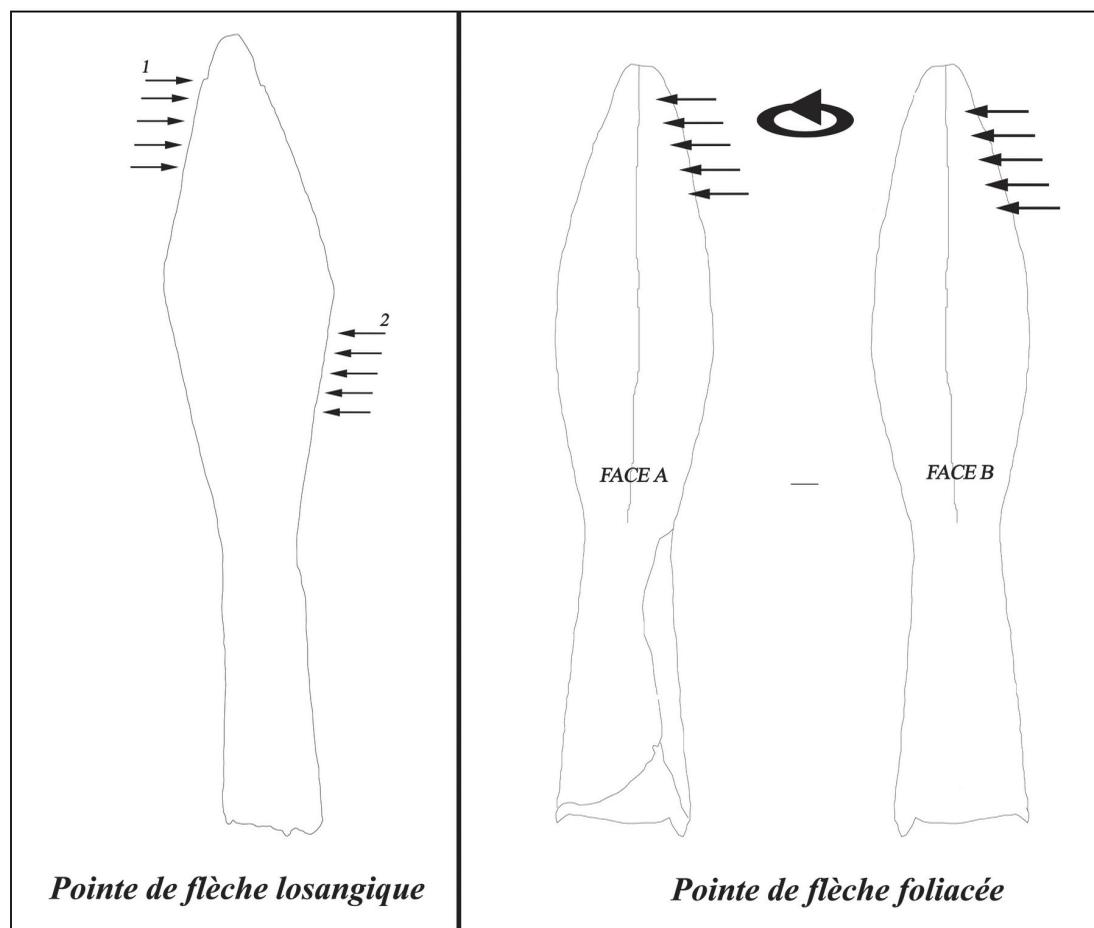


Figure 16. Schémas illustrant les étapes de réalisation des pointes de flèche losangiques et foliacées. Les petites flèches noires indiquent le sens du martelage.

Rejoignant des données sur le forgeage médiéval (Serdon et Fluzin, 2002; Serdon, 2005), une *certaine standardisation* de la taille des flèches est déjà patente dans nos simulations de forgeage à l'antique : toutes les pointes réalisées ont des poids très comparables, compris entre 12 et 16 grammes en général. Y a-t-il adéquation entre la taille de l'objet final et les dimensions de la barre de départ ? Cela est probable et cohérent avec le constat d'un outillage à peu près figé dès l'Antiquité.

Un bref récapitulatif des protocoles d'essai et des paramètres de forgeage les plus proches de ceux ayant conduit aux structures observées sur les pointes de flèche d'*Uxellodunum* et d'Alésia, permet donc de dégager trois points majeurs:

- utilisation exclusive du charbon de bois, d'essences dures (chêne, hêtre) surtout pour limiter les dépôts sur les parois du foyer;
- emploi très probable d'adjuvants de forgeage anti-oxydants -sable fin quartzueux des bords de la Dordogne, dans nos essais- bien que les scories vitreuses résiduelles correspondantes ne soient que très rarement observées, lors des examens métallographiques;

— refroidissement moyennement lent par agitation à l'air ambiant après forgeage à assez haute (voire très haute) température.

Dans nos recherches, nous avons volontairement exclu tout recours à des procédures de mesure des températures, délicates de mise en œuvre et peu significatives. Des indices visuels,

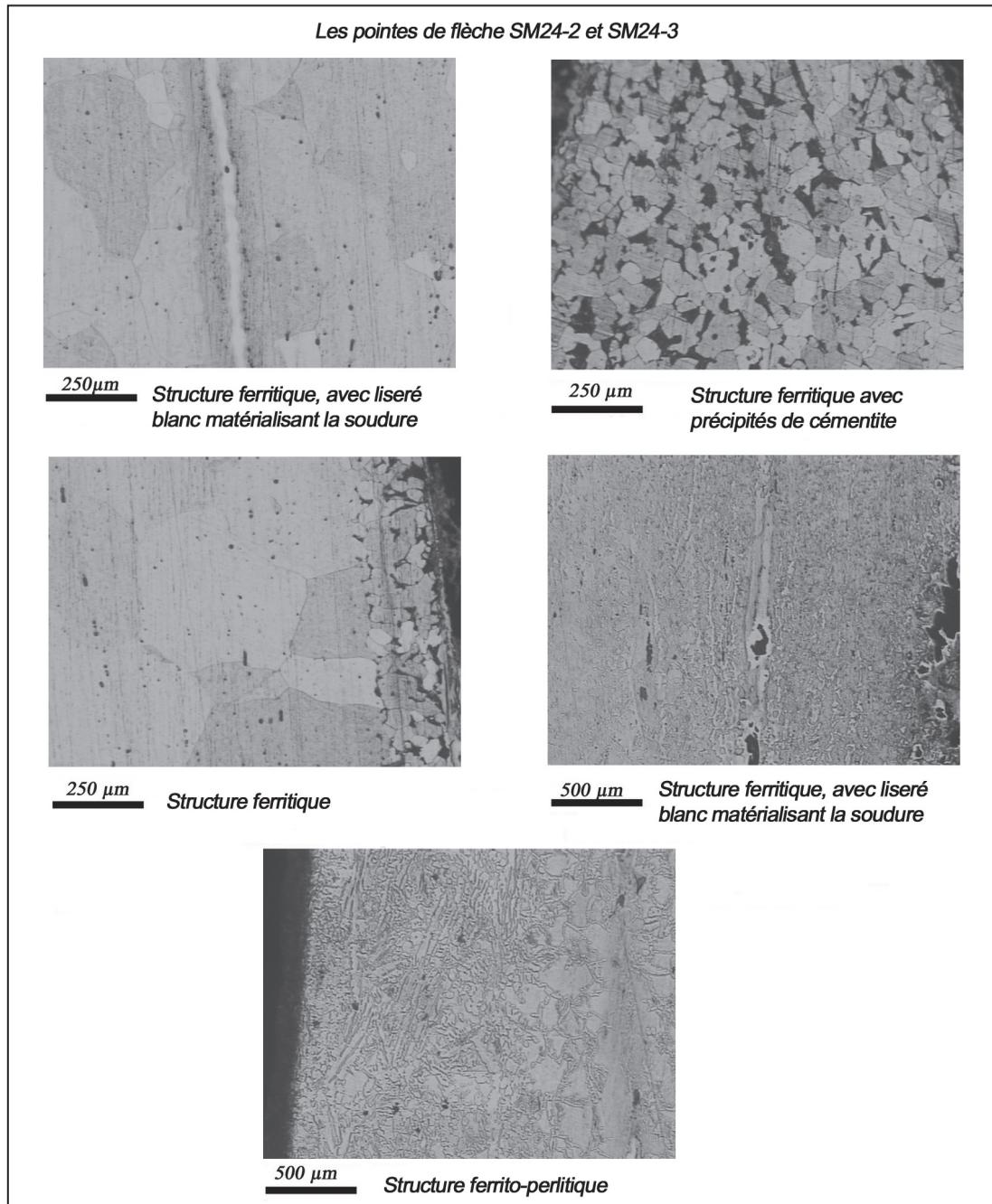


Figure 17. Les diverses microstructures observées sur les pointes de flèche issues du forgeage des barres antiques SM24.

tels que la couleur ou la vigueur des flammes, la couleur du métal et la présence (ou non) de particules pyrophoriques de métal dans les gaz s'échappant du foyer, nous sont apparus plus proches des perceptions du forgeron de l'Antiquité.

8.2. DES QUESTIONS ENCORE SANS RÉPONSE

L'analyse critique de l'ensemble des résultats et du déroulement des opérations de forgeage ne permet pas, à ce stade des travaux, de répondre encore à quelques questions majeures concernant les aspects *économiques* —productivité, consommation de combustible, organisation du travail— et *techniques* —typologie du foyer de forgeage, modalités du soufflage de l'air—; la poursuite des investigations sera donc dictée par cette attente.

8.2.1. *Surconsommation de combustible et faible productivité : conséquence probable de notre méconnaissance de la structuration réelle des postes de travail du forgeage antique*

Ces deux problèmes sont, nous semble-t-il, liés à la gestion-même des opérations, c'est-à-dire à l'organisation des postes de travail qui conditionnent la cadence de réalisation des pointes de flèche, objets relativement banals en soi.

Ainsi, a-t-on pu enregistrer une consommation de charbon de bois trois à six fois supérieure aux valeurs habituelles, atteignant par exemple, au cours de la seconde campagne d'essais, 75 litres de charbon de bois pour l'obtention de ... seulement 9 pointes de flèche.

Dans le cas présent, *un seul* forgeron a assuré la totalité des tâches, de *façon discontinuée*. La réalité était probablement tout autre dans l'Antiquité, notamment pour l'obtention rapide de ces objets dont la disponibilité (en pièces neuves et restaurées) devait être assurée dans l'urgence, lors d'un combat ou d'un siège, comme cela est, par exemple, rapporté lors de la guerre d'Afrique (César). On peut imaginer, en fait, *un atelier spécialisé avec un haut degré de division du travail* autour d'un feu permanent —par exemple, un *brasero* à tirage naturel—, géré en fonction des besoins spécifiques d'un lot homogène d'objets. *Autour d'un fourneau central*, certains seraient chargés de souffler de l'air pour maintenir les braises à la température adéquate, alors que d'autres auraient à réaliser à la chaîne une opération bien définie: frappe de la douille plate puis enroulée, frappe de la pointe, réalisation de la barbelure, gestion du traitement thermo-chimique (cémentation) ou thermique final. Le rendement de production serait alors incomparablement plus rapide et plus reproductible quant aux performances visées. D'ores et déjà, l'examen attentif et précoce des infrastructures de forgeage antique, des sols, des déchets associés et des rebuts —encore trop fragmentaire— conforte cette réflexion en fournissant des éléments de réponse partiels. Ainsi, certains ateliers sont manifestement ceux de professionnels maîtrisant des techniques sophistiquées, comme le souligne C. Domergue (2004); il estime que les forgerons durent être nombreux, car le temps nécessaire à la mise en forme d'une masse de métal donnée —surtout s'il s'agit de la fabrication d'objets relativement petits— est certainement supérieur au temps nécessaire à sa production en bas fourneau. Cette remarque s'applique parfaitement à la fabrication des pointes de flèche et les expérimentations menées dans cette étude semblent aller dans ce sens.

Diverses fouilles ont révélé l'existence de *groupes de foyers* dont les formes permettent d'avancer l'hypothèse de *fonctions spécialisées et complémentaires* (Serneels *et al.*, 2004), à Autun, Rennes, Metz, Bordeaux ou Blessey, par exemple.

La standardisation et la professionnalisation dans les ateliers de forge conduisent à imaginer l'existence de véritables manufactures spécialisées dans la production en série d'objets standardisés dont le rôle serait très important dans la vie et l'activité des cités. Se pose éga-

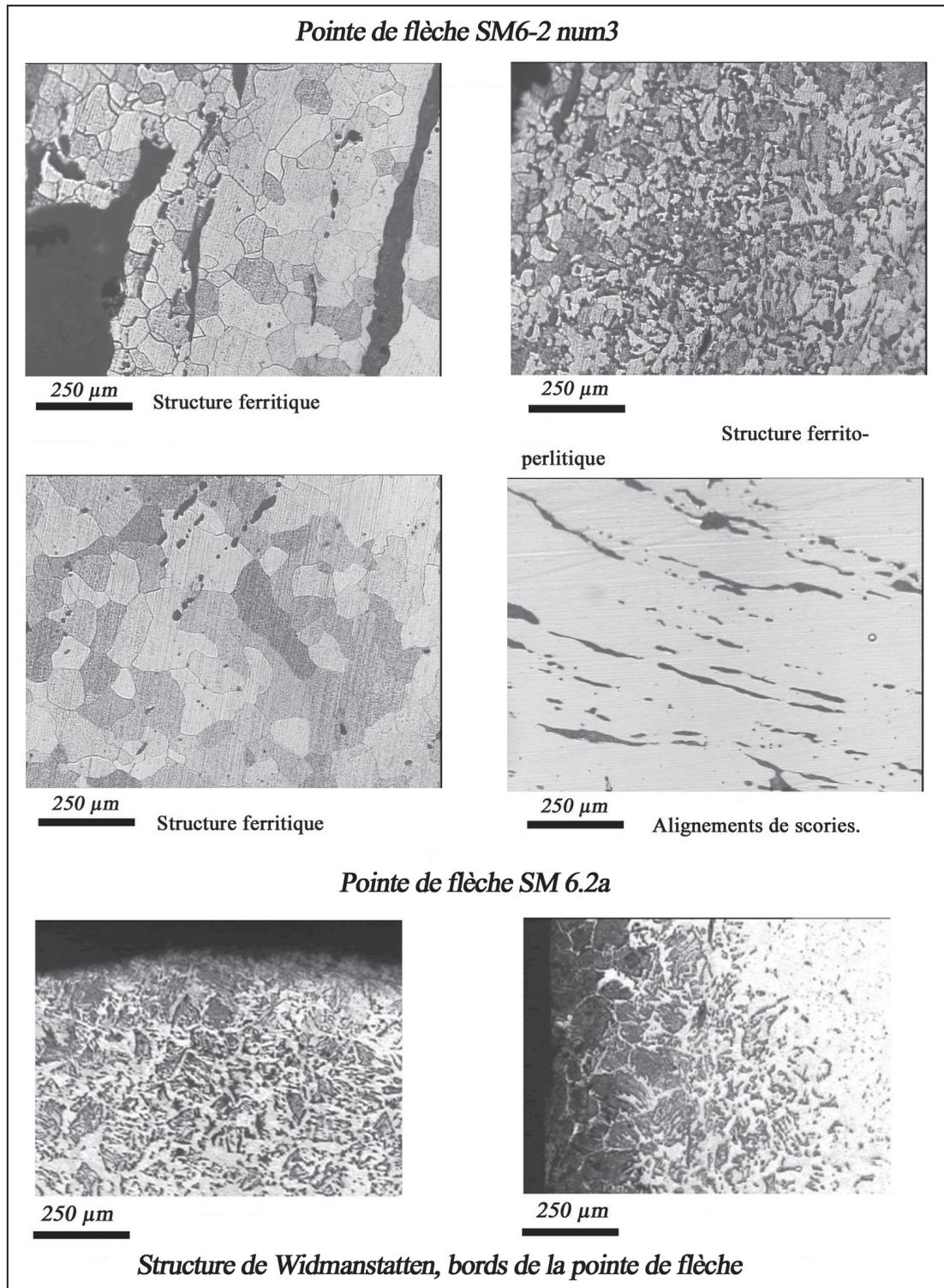


Figure 18. Les diverses microstructures observées sur les pointes de flèche issues du forgeage des barres antiques SM6.

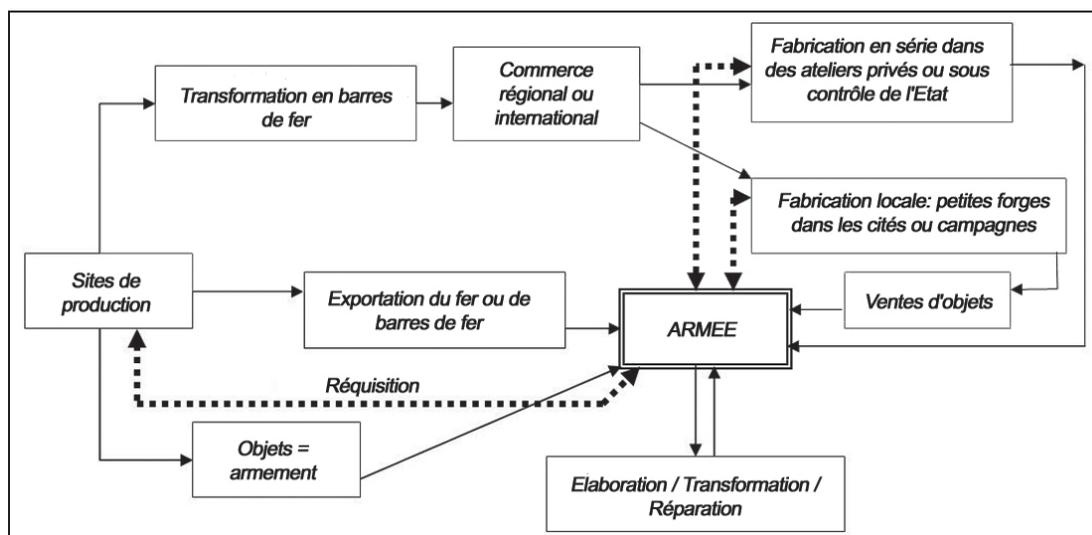


Figure 19. Schéma descriptif le plus probable de la production, du commerce et de la transformation du fer jusqu'au stade de son forgeage en armes, autour du début de notre ère (repris d'après Feugère et Serneels, 1998).

lement la question de l'organisation probable en réseaux des ateliers associés à chaque étape de la chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne et notamment de leurs liens avec l'armée romaine (Mangin, 1996; Feugère, 1998; Orengo, 2003); Plus tard d'ailleurs, à partir du III^e siècle, la fabrication d'armes —jusqu'alors assurée par des ateliers armuriers urbains— sera largement étatisée (Renoux, 2006 : 282-303). Même si l'on admet que les *fabricae* militaires aient réalisé un certain nombre d'armes pour les besoins propres à l'armée, une partie des besoins était probablement prise en charge par des ateliers de production locaux. Le I^{er} siècle a.C. voit s'accélérer la production et le caractère professionnel du travail des métaux (Feugère, 1998; Lebeau-pin, 1998) d'où, comme l'avancent plusieurs auteurs (Domergue, 2004; Leroy *et al.*, 2000), le marché pouvait déborder du cadre local et conduire, par exemple au Puy d'Issolud, à la mise en forme et à la récupération de métal.

Dans les cas d'extrême urgence —terrain de combat, par exemple— la qualité optimale ne pouvait être garantie. Ainsi se justifieraient certaines anomalies, tel l'espace observé à proximité de la base de la pointe de flèche (fig. 14); s'agit-il alors d'une mauvaise maîtrise du roulage de la douille par un forgeron peu expérimenté, d'un travail exécuté dans l'urgence ou d'un forgeage inachevé?

Au vu de ces considérations, on peut tenter de synthétiser l'articulation probable des diverses sources d'approvisionnement en armes de l'armée romaine, de la production du métal brut jusqu'à sa transformation, sans oublier l'étape de la commercialisation (fig. 19).

8.2.2. Une question technique à élucider : le rôle de la structure-même du foyer de forgeage et du soufflage vertical ou horizontal de l'air

Il s'agit là d'un aspect technique qui, semble-t-il, n'a pas reçu à ce jour de qualification argumentée. Il est, en effet, bien établi que les *foyers des forges antiques* étaient activés par des dispositifs de *soufflerie latérale*; l'arrivée d'air pouvait se faire par un orifice pratiqué au travers de la paroi du foyer ou par l'intermédiaire d'un bloc-tuyère placé au bord du foyer (Orengo, 2003). Ce dernier se présente généralement sous la forme de cuvettes peu profondes

pratiquées dans le sol, circulaires ou oblongues, adaptées à la pièce à forger. Dans le monde romain —notamment en Gaule— l'iconographie propose quelques structures de foyers de forge surélevés toujours équipés d'un dispositif de ventilation latérale, permettant aux artisans de travailler debout (Tylecote, 1987). *A partir du Moyen Âge, la ventilation devient verticale*; l'air est soufflé de bas en haut dans le foyer, désormais généralement surélevé. Pour notre étude, les circonstances ont mis à notre disposition un tel bas foyer (récent) à ventilation verticale.

Mais peut-on garantir l'identité des résultats, sur le plan de la microstructure et des propriétés de l'objet forgé, quel que soit le mode de ventilation, verticale ou horizontale et la configuration du bas foyer? Des essais complémentaires de ceux déjà effectués sont nécessaires et programmés pour répondre à cette question. Il importe, en effet, d'apprécier, pour un protocole d'essai donné (issu des éléments décrits dans les tableaux de l'Annexe 1), les effets d'une modification de la distribution des températures ou de la nature de l'atmosphère dans le foyer, lors des chauffes (simples, carburantes ou non) précédant la frappe du métal.

IX. CONCLUSIONS

Au terme des investigations métallographiques conduites sur des pointes de flèche obtenues par forgeage de barres de fer antiques — considérées dans nos travaux comme demi-produits intermédiaires dans la chaîne opératoire complète de la sidérurgie antique — on peut raisonnablement considérer que les principales données du protocole de forgeage ont été validées. La procédure adoptée est donc l'une — sinon la seule — des voies techniques de production par forgeage à chaud des pointes de flèche, dans des typologies et des états structuraux conformes à ceux identifiés sur cette classe d'objets antiques.

Les campagnes d'expérimentation ont permis de mettre en évidence la plupart des facteurs majeurs (sinon leur totalité) qui régissent le forgeage du fer antique; les difficultés de définition des paramètres du forgeage et l'analyse des effets sur le métal sont exacerbés par la complexité naturelle du fer et des alliages qu'il forme avec le carbone.

La maîtrise technique du forgeage et du soudage-forgeage du fer nécessitent, comme le soulignent les échecs et le soin tout particulier apporté à chaque phase de la réalisation, un savoir-faire et une expérience professionnelle de grande qualité. Les forgerons de l'antiquité gallo-romaine les possédaient à un haut niveau : les objets archéologiques examinés en témoignent. On peut d'ailleurs transposer à la métallurgie du fer l'analyse de C. Levi-Strauss (1987) sur l'artisanat de la céramique qui ne laisse guère de place au hasard : « C'est la combinaison imaginée, voulue, cherchée et expérimentée de toutes les opérations qui seule permet la réussite. On doit donc distinguer avec soin la transmission d'une technique d'une génération à une autre et la création ou l'amélioration des techniques au sein de chaque génération. Celles-ci supposent toujours la même puissance imaginative et les mêmes efforts acharnés de la part de certains individus, quelle que soit la technique particulière qu'on ait en vue ».

A côté de l'objectif scientifique auquel notre approche archéométrique a permis de répondre en fournissant les éléments principaux de la procédure du forgeage, il importe à présent d'approfondir au moins deux aspects du domaine du forgeage du fer dans l'antiquité : l'un à *connotation socio-économique et technique* à la fois; il s'agit d'explicitier l'organisation du travail autour de la forge permettant d'atteindre les performances visées et les rythmes de production souvent très contraignants, notamment dans le domaine des armes à cette époque. La confrontation des données archéométriques sur les objets, des caractéristiques archéologiques et structurelles d'un nombre croissant d'ateliers de forgeage et de leur distribution géographique (Pleiner, 2005) ne peut qu'être favorable à cette démarche. L'autre, de *nature technique*;

il s'agit alors de s'attacher à caractériser l'incidence de la structure du bas foyer de forgeage — typologie, implantation, modalités du soufflage (horizontal ou vertical) de l'air — sur les caractéristiques et performances d'un objet forgé donné (les pointes de flèche, en l'occurrence dans cette étude) et sur des discriminations éventuelles pour sa réalisation.

Alors atteindra-t-on une meilleure connaissance de l'histoire des techniques du forgeage et de l'armement durant l'Antiquité par une approche conjuguée archéologique et archéométrique.

BIBLIOGRAPHIE

- CESAR: *Guerre d'Afrique*, 20. Paris, Les Belles Lettres.
- CREW, P. (1993): «Currency bars in Great Britain. Typology and function», M. Mangin (ed.), *La sidérurgie ancienne de l'est de la France dans son contexte européen: archéologie et archéométrie* (Actes du Coll. de Besançon). Paris, Les Belles Lettres: 346-347.
- DECHELETTE, J. (1927): *Manuel d'archéologie préhistorique, celtique et gallo-romaine* (8 vol.). Paris, Auguste Picard, vol. IV: 859.
- DIEUDONNE-GLAD, J. et al. (2001): «Metallography of five flat iron bars with socket from the river Saône (France)». *Historical Metallurgy*, 35, 2: 67-73.
- DOMERGUE, C. (2004): *Fer et Société*, M. Mangin (dir.), *Le Fer*. Paris, Errance: 201.
- DOSWALD, C. et al. (1997): *Technique des fouilles; minerai, scories, fer*. GASF/SAGEA, 2.^e édit. Bâle 1997: ch.5, 42, fig.16.
- DUNIKOWSKI, C. et al. (1996): «L'atelier de forge gallo-romain de Nailly (Yonne): contribution à la caractérisation des déchets de production». *Revue Archéologique de l'Est*, 47: 120, fig.30.
- DUVAL, A. (1952): «Vulcain et les métiers du métal». *Gallia*, X: 43-57.
- DUVAL, A. (1970): «Les pointes de flèche d'Alésia au Musée des Antiquités Nationales». *Antiquités Nationales*. St Germain-en-Laye, 2: 35-51.
- FEUGÈRE, M. et SERNEELS, V. (1998): «Production, commerce et utilisation du fer entre l'Ebre et le Rhône: premiers éléments de réflexion», M. Feugère et V. Serneels, (dirs.), *Recherches sur l'économie du fer en Méditerranée nord-occidentale. Monographie Instrumentum*, 4, Montagnac, M. Mergoïl: 259-260.
- FLUZIN, P. et al. (2004): «Approches métallurgiques et archéométriques», M. Mangin (dir.), *Le Fer*. Paris, Errance.
- GIRAULT, J. P. et BILLIANT, P. (à paraître): *Puy d'Issolud (Lot). Historique des recherches et découvertes archéologiques (Partie I); figures des objets découverts à la Fontaine de Loulié et au Puy d'Issolud (partie II)*.
- GUILLAUMET, J. P. (1998): «Les pinces dites de forgeron», G. Nicolini et N. Dieudonné-Glad (dirs.), *Les métaux antiques: travail et restauration. Actes du colloque de Poitiers, 28-30 sept. 1995. Monographie Instrumentum*, 6, Montagnac, M. Mergoïl: 1-6.
- LEBEAUPIN, D. (1998): «Ateliers de forgerons et témoins dispersés du travail du fer à Lattes (Hérault) (IV^e s. av.-I^{er} s. ap. J.-C.)», M. Feugère et V. Serneels (dirs.), *Recherches sur l'économie du fer en Méditerranée nord-occidentale*. Montagnac, M. Mergoïl, *Monographie Instrumentum*, 4: 80-95.
- LEROY, M. et al. (2000): «La sidérurgie dans l'Est de la Gaule», C. Domergue et M. Leroy (éds.), *Mines et métallurgie en Gaule. Recherches récentes. Gallia*, 57: 19.
- LEVI-STRAUSS, C. (1987): «Hasard et civilisation», *Race et histoire*. Paris, Gallimard: 59-60.
- LONG, L. et al. (2000): «Les épaves antiques de Camargue et le commerce maritime du fer en Méditerranée nord-occidentale (I^{er} s. av. J.-C.-I^{er} s. ap. J.-C.)». *L'Africa Romana*, XIV: 161-188.
- MANGIN, M. (1996): «La métallurgie du fer en Gaule (Tène finale et époque romaine): recherches récentes en archéologie et archéométrie». *Revue Archéologique de l'Est*, 47: 188-189.
- ORENGO et al. (2000): «L'emploi des blocs tuyères dans les forges antiques du Centre de la Gaule. Auvergne, Lyonnais et Forez au deuxième âge du fer et à l'époque romaine. Découvertes archéologiques et expérimentation», M. Feugère et M. Gustin, *Iron, Blacksmiths and Tools. Ancient European Crafts*. Montagnac, M. Mergoïl, *Monographie Instrumentum*, 14: 90-92.

- ORENGO, L. (2003): *Forges et forgerons dans les habitats laténiens de la Grande Limagne d'Auvergne. Monographie Instrumentum*, 26, Montagnac, M. Mergoil: 182-183.
- PLATON: *Euthydème*, 289a-b.
- PLEINER, R. *et al.* (2003): «Lingots et couteaux en fer d'Alésia: études archéométriques de pièces inédites». *Revue Archéologique de l'Est*, 52: 91-130.
- PLEINER, R. (2005): *Iron in Archaeology: the European bloomery smelters*. Prague, Archaeological Institute of the Academy of Sciences.
- REDDE, M. (1978): «Les scènes de métier dans la sculpture funéraire gallo-romaine». *Gallia*, 36: 44-63.
- RENOUX, G. et DABOSI, F. (2001): «Première étude paléométallurgique des armes en fer du Puy d'Issolud (Lot)». *Revue de Métallurgie-CIT Sciences et Génie des Matériaux*, 98, n.° 12: 1147-1158.
- RENOUX *et al.* (2004): «Les armes en fer d'Uxellodunum (Puy d'Issolud, Lot), dernière bataille de César en Gaule: étude paléométallurgique de pointes de flèche et de trait de catapulte. Actes du Colloque international GMPCA Archéométrie 2003, Bordeaux». *Revue d'Archéométrie*, 28: 141-152.
- RENOUX, G. (2006): *Les archers de César. Recherches historiques et paléométallurgiques sur les archers dans l'armée romaine et leur armement du I^{er} s. av. J.-C. au I^{er} s. ap. J.-C., de César à Trajan*. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse II-Le Mirail, texte dactylographié.
- ROSMORDUC, J. (dir) (1997): *Histoire des sciences et des techniques. Actes du Colloque de Morgat, 20-24 mai 1996*. Rennes, CRDP 1997.
- SERDON, V. et FLUZIN, Ph. (2002): «Etude paléométallurgique de fers de traits du Moyen-Âge, contribution à l'histoire des techniques». *Revue d'Archéométrie*, 26: 217.
- SERDON, V. (2005): *Armes du Diable. Arcs et arbalètes au Moyen-Âge*. Rennes, PUR: 135-139.
- SERNEELS, V. *et al.* (2004): «Les activités de forge: le travail du métal», M. Mangin (dir.), *Le Fer*. Paris, Errance: 92.
- TYLECOTE, R. F. (1987): *The early history of metallurgy in Europe*. Londres et New York, Longman.

Recibido: 17/06/2008

Aceptado: 20/02/2009

ANNEXE 1

N.° D'ESSAI	CARACTÉRISTIQUES DU PROTOCOLE DE RÉALISATION DES POINTES DE FLÈCHE
Essai 1 (<i>flèche à une barbelure</i>)	Tête de la barre aplatie en 3 étapes de forgeage (avec réchauffages intermédiaires vers 650°C) ; ensuite : – roulage à l'enclume en une étape ; – douille, tenue par pince, séparée de la barre au tranchet ; – frappe pour façonnage de la pointe à 4 faces ; – pliage à chaud de la pointe pour réalisation de la barbelure. Frappe latérale vers 650–700°C pour donner de l'élasticité à la barbelure ; – refroidissement lent dans la cendre.
Essai 2 (<i>flèche à une barbelure</i>)	Forgeage à haute température (800°C), prolongé, avant réalisation de la douille, séparée ensuite au tranchet <i>But recherché : Soudage de la barbelure au corps principal de la flèche</i> – façonnage de la pointe à plus haute température (vers 1100° à 1200°C) avec récupération des battitures. Reprise de la pointe à très haute température ; – réalisation de la barbelure. Forgeage final après chauffage vers 1200°C. <i>Remarque : Très importante consommation de charbon de bois.</i>
Essai 3 (<i>flèche droite puis à barbelure</i>)	Forgeage à très haute température (1200-1300°C), <i>en conditions non carburantes</i> , jusqu'à l'apparition de particules de fer pyrophoriques : – frappe de la douille vers 850-900°C ; – après obtention de la pointe, réchauffage vers 900-1000°C puis refroidissement rapide ; – violent coup de marteau à froid sur la pointe (<i>objectif : déformation à l'impact et réutilisation ultérieure éventuelle</i>) ; – nouvelle séquence de forgeage et réalisation d'une barbelure ; <i>Protocole identique à celui retenu pour l'essai 2 ; objectif : soudage de la barbelure sur le corps principal de la flèche.</i>
Essai 4 (<i>flèche droite</i>)	Forgeage à moyenne température, <i>en conditions carburantes</i> . – même protocole de fabrication que celui des essais précédents ; – ajout de charbon de terre (anthracite) ; – immersion dans pot de battitures (?) : <i>cémentation</i> .
Essai 5 (<i>flèche droite</i>)	Même protocole que pour l'essai 3, en conditions <i>non carburantes</i>

A. Essais de forgeage sur barre d'acier à béton (Ø8 mm) (tests d'orientation).

N° D'ESSAI	CARACTÉRISTIQUES DU PROTOCOLE DE RÉALISATION DES POINTES DE FLÈCHE
<i>Obtention de la barre destinée au forgeage des pointes de flèche</i>	<i>L'utilisation de la barre de fer brute SM6 a nécessité une préparation préalable. amenant par forgeage le tronçon initialement prélevé (long de 5 cm) à la taille d'un barreau, long de 50 cm et d'une section carrée de 1 cm²</i> – étirement du prélèvement manuellement. Lors de la première frappe du bloc débarrassé de sa croûte de corrosion, colonisée par des coquillages, dégagement gazeux intense et irritant de produits chloro-soufrés (?), jaunâtres se déposant en partie sur l'enclume ; – poursuite de l'étirement au marteau-pilon : grande malléabilité, absence de fissuration et de dégradation du métal jusqu'au stade final.
Essai 6 ₁ <i>(flèche à une barbelure)</i>	Même protocole que pour l' essai 2 , <i>en conditions non carburantes</i> : – couleur très homogène de la pièce à la sortie du creuset de chauffe (orange vif) ; – recherche du soudage de la barbelure au corps principal de la flèche ; – récupération des battitures associées au forgeage du plat de la douille.
Essai 6 ₂ <i>(flèche droite)</i>	Flèche droite : même protocole que pour l' essai 3 <i>en conditions non carburantes</i> .
Essai 6 _{3.1} <i>(flèche à une barbelure)</i>	<i>Essai exclusivement fait au charbon de bois très dense (châtaignier) :</i> – maintien de la barre préforgée dans le charbon de bois pour carburation ; – après réalisation de la douille, préformage de la pointe dans du sable de Dordogne ; – fusion du métal presque atteinte ; – réalisation de la barbelure : immersion dans le sable puis pliage. La carburation très forte provoque l'éclatement de la pointe : nécessité d'un resoudage de l'extrémité de la pointe ; – essai stoppé car carburation trop forte.
Essai 6 _{3.2} <i>(flèche à une barbelure)</i>	<i>Carburation préalable de la barre</i> par maintien de 45 mn au feu : – nombreuses passes de forgeage, chacune de courte durée ; – production abondante de battitures et perte importante de métal.
Essai 6 _{3.3} <i>(flèche à une barbelure)</i>	<i>Le barreau résiduel est d'abord étiré</i> par forgeage au marteau-pilon. Il retrouve sa malléabilité initiale : – forgeage avec soudage, sans carburation nouvelle. Carburation effectuée plus tard ; – réalisation de la douille : carburation encore élevée, mais le forgeage reste aisé. Consommation de charbon de bois importante ; – après soudage de la barbelure, refroidissement par agitation dans l'air de l'atelier (température ambiante de l'ordre de 10°C).
Essai 6 _{3.4} <i>(flèche à une barbelure)</i>	<i>Essai identique au précédent, sauf pour la phase finale du refroidissement. Recherche de la structure de Widmanstätten :</i> – trempe dans une bouillie d'argile : bouillonnement intense de la mixture, laissant espérer une chute de température assez rapide entre 800 et 600°C puis un refroidissement plus lent jusqu'à l'ambiante.
Essai 6 _{3.5} <i>(flèche à une barbelure)</i>	<i>Refroidissement final par trempe à l'eau froide :</i> – essai identique à l'essai 6 _{3.3} pour toutes les autres étapes de l'essai.

B. Essais de forgeage sur tronçon de la barre de fer SM6 provenant de l'épave des Saintes-Maries-de-la-Mer.

N.° D'ESSAI	CARACTÉRISTIQUES DU PROTOCOLE DE RÉALISATION DES POINTES DE FLÈCHE
	Comme pour les barres de fer précédentes, la barre retenue est étirée, d'abord manuellement, puis au marteau-pilon par économie de temps. Le forgeage est aisé. Le métal est plus malléable que celui de la barre des Saintes-Maries-de-la-Mer (SM6). De plus, il conserve mieux la chaleur.
Essai SBC ₁ (flèche à une barbelure)	Même protocole de fabrication que celui relatif aux autres pointes de flèche : – pointe « mouillée » avec du sable avant étirage final ; – réchauffage de la pointe. Vitrification du sable en surface de l'ébauche ; – pliage de la barbelure. Ressuage du verre lors de l'essai du forgeage-soudage réalisé à température élevée ; – refroidissement par agitation dans l'air de l'atelier.
Essai SBC ₂ (flèche à une barbelure)	Même protocole qu'en SBC ₁ : – refroidissement final par trempe dans la bouillie d'argile.

C. Essais de forgeage sur l'une des barres de fer de Saint-Bertrand-de-Comminges.

N.° D'ESSAI	CARACTÉRISTIQUES DU PROTOCOLE DE RÉALISATION DES POINTES DE FLÈCHE
Essai SM _{6-2(a)} (flèche à une barbelure)	Protocole d'essai identique à celui adopté pour l'essai SBC ₁ : – fibrage de la barre forgée qui, lors de l'ébauchage de la pointe de flèche (extrémité de la tête), tend à se fissurer ; – « mouillage » intermédiaire dans le sable avant poursuite du forgeage ; – refroidissement par agitation dans l'air.
Essai SM _{6-2(b)} (flèche à une barbelure)	La barre n'a pas séjourné dans le foyer (à l'inverse de SM6), évitant ainsi les ennuis rencontrés pour l'essai 6 _{3,2} : – essai identique à celui conduit en SM _{6-2(a)} ; – trempe finale dans la bouillie d'argile. Réalisation d'une barbelure à ardillon rond. Après refroidissement total de la flèche, la malléabilité de la douille reste dure et souple à la fois.

D. Essais de forgeage sur une autre barre des Saintes-Maries-de-la-Mer (SM6-2).

N.° D'ESSAI	CARACTÉRISTIQUES DU PROTOCOLE DE RÉALISATION DES POINTES DE FLÈCHE
Essai 1	Sur SM-6 : barre en partie délitée, représentative d'une structure défectueuse, fissuration apparaissant au niveau de la douille. Le but de cet essai était de reproduire, comme on l'observe sur certaines pointes de flèche, un espace entre la douille et la tête de la pointe. Ce trou témoigne d'un travail inachevé. L'essai est stoppé dès l'obtention de cet espace.
Essai 2	Sur SBC 34.01 : flèche à une barbelure. On cherche à reproduire le cas où nous avons optimisé les conditions d'obtention de la structure de Widmanstätten et du liseré (soudure) (<i>cf. SBC1</i>) : – utilisation de sable très fin ; – soudage obtenu au prix de plusieurs chauffés ; l'ardillon semble parfaitement soudé ; – maintien de 2 minutes à très haute température ; – refroidissement à l'air libre avec agitation (température ambiante voisine de 0°C).
Essai 3	Sur SM6-2 : mêmes conditions que pour l'essai 2 ; seule, la barre diffère. – charbon de bois constitué d'un mélange de frêne, chêne et hêtre.
Essai 4	Sur SM6-2 : réalisation d'une pointe de flèche de type Alésia <i>foliacée à un aileron, avec soudure</i> . – échec de la manipulation.
Essai 5	Sur SM6-2 : mêmes conditions que pour l'essai 4. – coup de burin final pour séparer la barbelure. – résultat conforme à la typologie de cette flèche.
Essai 6	Sur SM6-2 : réalisation d'une pointe de flèche <i>losangique avec nervure sur une seule face</i> .
Essai 7	Sur SM6-2 : réalisation d'une flèche <i>foliacée avec nervures sur les deux faces</i> .
Essai 8	Sur SM6-2 : même essai qu'en 2 et 3. refroidissement à l'air libre avec une température extérieure voisine de 8 à 9°C.
Essai 9	Sur SBC 34.01 : même essai qu'en 2 mais avec une température extérieure de 8 à 10°C.

E. Série d'essais de validation des conclusions tirées des expérimentations précédentes.

N.° D'ESSAI	CARACTÉRISTIQUES DU PROTOCOLE DE RÉALISATION DES POINTES DE FLÈCHE À PARTIR D'UNE BARRE ISSUE DE L'ÉPAVE SM24-03-20
Essai 1 (flèche à une barbelure)	<i>Mêmes étapes de réalisation jusqu'au stade de la tête, puis :</i> – décapage de la tête avec une lime + sable : réchauffage entre 1100 et 1200°C (couleur rouge cerise) ; – refroidissement à l'air libre dans la forge.
Essai 2 (flèche à une barbelure)	<i>Même protocole que celui de l'essai précédent, puis :</i> – maintien prolongé de la pointe de flèche à 1100°C ; – limage de la tête avant mise en forme de la barbelure ; – trempe dans le sable ; – étirage de la tête après soudage de la barbelure ; – maintien de la pointe de flèche à environ 1200°C ; – refroidissement à l'air libre avec agitation.
Essai 3 (flèche à une barbelure)	<i>Même protocole que précédemment, puis :</i> – chauffe de la pointe de flèche vers 1100°C ; – agitation à l'air libre. 500°C.

F. Nouveaux essais de validation des conclusions tirées des expérimentations précédentes.