ArcheoSciences

Revue d'archéométrie

41-2 | 2017

Varia

Des ateliers de bronziers romains à Berytus (II^e-III^e s. apr. J.-C.) : les vestiges du site SFI654 (Beyrouth, Liban)

Roman bronze workshops at Berytus (2nd-3rd century AD): the remains from the SFI654 site (Beirut, Lebanon)

Ziad El Morr, Nicolas Thomas, Michel Pernot, Nadia Cantin, Hadi Choueiry et Darine Zgheib

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/archeosciences/4967>

DOI : 10.4000/archeosciences.4967

ISBN : 978-2-7535-7393-2

ISSN : 2104-3728

Éditeur

Presses universitaires de Rennes

Édition imprimée

Date de publication : 8 décembre 2017

Pagination : 35-52

ISBN : 978-2-7535-7391-8

ISSN : 1960-1360

Référence électronique

Ziad El Morr, Nicolas Thomas, Michel Pernot, Nadia Cantin, Hadi Choueiry et Darine Zgheib, « Des ateliers de bronziers romains à Berytus (II^e-III^e s. apr. J.-C.) : les vestiges du site SFI654 (Beyrouth, Liban) », *ArcheoSciences* [En ligne], 41-2 | 2017, mis en ligne le 08 décembre 2019, consulté le 28 janvier 2022. URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/4967> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/archeosciences.4967>

Des ateliers de bronziers romains à Berytus (II^e-III^e siècles apr. J.-C.) : les vestiges du site SFI654 (Beyrouth, Liban)

Roman Bronze Workshops at Berytus (2nd-3rd Century AD): The Remains from the SFI654 Site (Beirut, Lebanon)

Ziad EL MORR^a, Nicolas THOMAS^b, Michel PERNOT^c, Nadia CANTIN^c,
Hadi CHOUERY^d et Darine ZGHEIB^e

Résumé : Les vestiges d'ateliers de bronzier découverts sur le site SFI654 à Beyrouth offrent une occasion rare d'étudier la fonderie de grands bronzes durant la période romaine. Il s'agit de trois fosses de coulée datées du II^e-III^e s. apr. J.-C. et installées dans l'une des cours d'un complexe architectural à fonction cultuelle et rattaché à un bain. L'examen rigoureux de la totalité des restes en terre cuite et en alliage à base de cuivre ainsi que l'analyse élémentaire et structurale d'échantillons représentatifs ont permis d'approcher les moyens techniques de production et de caractériser les matériaux utilisés, tant métalliques que céramiques. La nature de la production comprend vraisemblablement des récipients de grandes dimensions et des cadres de portes monumentales destinés au complexe architectural. Les données ont permis de dévoiler quelques aspects jusqu'à présent peu connus concernant des parties importantes du processus de fabrication. Elles ont révélé la présence de grands creusets, en forme de bassin, fixes pour fondre du bronze au plomb. Finalement, cette étude permet d'entamer une comparaison entre des sites d'atelier de grands bronzes au Proche Orient et en Europe occidentale et d'étudier les similitudes et les différences de savoir-faire des bronziers à travers l'Empire romain.

Abstract: The remains of bronze workshops discovered at SFI654 site in Beirut offer a rare opportunity to investigate bronze casting during the roman period. These consist mainly of three casting pits dated to the 2nd-3rd century AD and located in an architectural complex that probably had a religious function and to which a bath was associated. The careful examination of all technical ceramics and copper base alloy remains and the analyses of a representative group of samples helped understanding how these pits worked. The casting activity took place during the construction of the complex and it aimed at furnishing it with basins and monumental doorframe fittings. Furthermore, the evidence revealed crucial steps of the manufacturing process of large bronzes. These shows that the melting of the leaded bronze alloys was done in stationary large crucibles. The results from this investigation initiated a comparison between workshops of large bronzes from the Near East and Western Europe allowing us to reveal the similarities and differences in the know-how of bronze casting craftsmen throughout the Roman Empire.

Mots clés : Empire romain, Berytus, atelier de bronziers, grands bronzes, terres cuites, creuset, moule, four, bronzes au plomb.

Keywords: Roman Empire, Berytus, bronze workshops, large bronzes casting, crucible, mold, furnace, leaded bronze.

^a Lebanese Atomic Energy Commission, National Council for Scientific Research, LAEC Bldg. – Airport Road, PO Box 11, 8281 BEYROUTH, Liban. (zelmorr@cnsr.edu.lb)

^b Institut national de recherches archéologiques préventives (INRAP); Laboratoire de Médiévisstique Occidentale de Paris, UMR 8589, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne – CNRS – 8 av. Sully, F-75004 PARIS, France. (nicolas.thomas@inrap.fr)

^c Institut de Recherche sur les ArchéoMATériaux (IRAMAT)-Centre de Recherche en Physique Appliquée à l'Archéologie (CRPAA), UMR5060, CNRS-Université Bordeaux Montaigne, 33 607 PESSAC, France. (michel.pernot@u-bordeaux-montaigne.fr) (ncantin@u-bordeaux-montaigne.fr)

^d Université Libanaise, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Dekwaneh – Tal el Zaatar, Liban. (hadi.chouery@gmail.com)

^e Archéologue indépendant, BEYROUTH, Liban. (zgheib_darine@hotmail.com)

1. INTRODUCTION

Des fouilles préventives menées sur trois sites adjacents (JEM002, JEM003 et SFI654), situés à l'est du centre-ville de Beyrouth, ont révélé un nombre important de vestiges en relation avec la production de grands bronzes¹ (figure 1a). Les aires de travail découvertes ont fonctionné quelque part entre la deuxième moitié du II^e siècle apr. J.-C. et la première moitié du III^e siècle apr. J.-C. durant la phase de construction d'un complexe architectural. Celui-ci, probablement à vocation cultuelle, est rattaché du côté sud à un bain et s'étend au moins sur une surface de 10 000 m². Les activités métallurgiques se sont déroulées durant la phase de construction du complexe. L'ampleur de ces activités diffère d'une parcelle à l'autre, cependant elles présentent toutes des caractéristiques communes qui se manifestent par la présence d'une ou de plusieurs fosses de coulée présentant des bases de moule de grandes dimensions conservées in situ et des restes d'activités métallurgiques constitués principalement de déchets en terre cuite et en alliages cuivreux. Des études ont été menées sur les vestiges des sites JEM003 et SFI654 (El Morr, à paraître). Dans cet article nous présentons les données obtenues à partir du travail interdisciplinaire effectué sur les vestiges du site nommé SFI654.

Les ateliers de production de grands bronzes de la période romaine sont rares, mal conservés et peu étudiés. Dans la partie européenne de l'Empire romain, des vestiges comme des fosses de coulée, des fragments de moules et, plus rarement, de creusets ont été retrouvés en France (Adamski *et al.*, 2011 ; Grandjeux, 2005 ; Guyard, 2003 ; Thomas *et al.*, 2012 ; Thomas *et al.*, 2015), en Suisse (Furger, 1998 ; Morel *et al.*, 2001), en Grèce (Mattusch, 1977 ; Zimmer, 1990) alors qu'au Proche Orient des restes comparables ont seulement été reconnus à Gerasa en Jordanie (Khalil *et al.*, 2013). Les découvertes réalisées dans le centre de Beyrouth offrent donc une occasion inédite pour mieux documenter les pratiques de fonderie de grands bronzes dans l'Empire romain et plus particulièrement en Orient. Notre premier objectif est d'étudier le savoir-faire des bronziers par l'intermédiaire des vestiges métallurgiques pour reconstituer le mode de fonctionnement des ateliers (Pernot, 2011). L'approche à la fois archéologique et archéométrique est fondée sur l'étude complète des restes retrouvés, dont les terres cuites dites « techniques », comme les fragments de moules, de fours ou de creusets et les déchets en alliage à base de cuivre comme les chutes de fonderie ou encore les chutes de découpe.

1. Les grands bronzes représentent des objets constitués « d'une ou plusieurs pièces, dont au moins l'une d'entre elles a nécessité, pour sa fabrication, plus d'une dizaine de kilogramme d'un alliage à base de cuivre » (Adamski *et al.*, 2011)

2. PRÉSENTATION DES VESTIGES DES ACTIVITÉS MÉTALLURGIQUES

La parcelle SFI654 de forme quasiment rectangulaire présente une orientation nord-sud et s'étend sur une superficie modeste de 226 m². Une grande partie des vestiges de la période romaine atteste de la phase de construction et de l'utilisation d'une partie d'un complexe architectural à vocation cultuelle. Trois fosses de coulée, désignées ici A, B et C, respectivement alignées d'ouest en est ont été dégagées dans le secteur sud du chantier. La zone où l'activité de fonderie se déroulait a été interprétée comme étant une des cours du complexe. Elle est limitée au nord par une tranchée de fondation orientée est-ouest (figures 1B et 1C). Chacune des fosses A et B présente deux phases de production reconnaissables par deux types de structures en terre préservées in situ. Celles-ci, situées au fond des fosses, ont été identifiées comme des bases de moules, notamment du fait de la nature du matériau, des traces de chauffe typiques, et de quelques infiltrations de métal en alliage à base de cuivre. Cette identification est aussi fondée sur leur analogie avec des vestiges retrouvés dans des fosses de coulée en France (Thomas *et al.*, 2012 et 2015) et en Grèce (Mattusch, 1977).

La première phase de production est représentée par deux bases de moules circulaires (figure 1B). Les deux fosses avaient une profondeur d'environ 85 cm. Les parois ont été détruites par les travaux de réaménagement de la phase suivante. La seconde phase de production est attestée par la présence de deux bases de moules rectangulaires, au fond de fosses d'une profondeur d'environ 50 cm, construites sur des couches de remblais superposées aux moules circulaires (figure 1C). Les fosses sont orientées nord-sud et leurs dimensions maximales conservées sont respectivement de 260 sur 224 cm et 274 sur 185 cm. Toutes les bases de moule ont conservé une partie de l'empreinte des objets coulés.

À l'issue de la seconde phase de production, les deux fosses ont été comblées au moyen de remblais riches en déchets produits par l'activité métallurgique, comme des fragments de terre cuite dites « techniques », des artefacts en alliages à base de cuivre et du charbon de bois. Des travaux de construction de la période Ottomane ont détruit le sud de la fosse A et l'ouest de la fosse B ainsi que les bases des moules situées dans ces zones.

La médiocre conservation de la fosse C s'oppose à l'identification du type et du nombre d'objets produits. Elle présente une forme rectangulaire avec des dimensions maximales conservées de 95 sur 60 cm et une profondeur de 105 cm.

Figure 1 : (Voir planche couleur IX) A) Plan du centre-ville de Beyrouth indiquant les principaux vestiges monumentaux de la période romaine (en gris) selon Curvers et Stuart (1998-1999, 2007) et les sites de JEM002, JEM003, JEM004 et SFI654 (© H. Choueiry); B) Plan des fosses et des bases de moules durant la phase 1; C) Plan des fosses et des bases de moules durant la phase 2.
 Figure 1: (See colour plate IX) A) Plan of Downtown Beirut showing the main Roman period monumental structures (in gray) according to Curvers and Stuart (1998-1999, 2007) as well as the sites of JEM002, JEM003 and SFI654 (© H. Choueiry); B) Plan of the pits and the mold bases of phase 1; C) Plan of the pits and the mold bases of phase 2.

Les moules circulaires

La première phase de production dans les fosses A et B est représentée par les restes de deux moules circulaires désignés ici A1 et B1 (figure 2a et 2b). Ces restes représentent les parties inférieures des moules et seront donc appelés les bases des moules. À celles-ci s'ajoutent par endroits des restes de parois verticales internes et externes. L'épaisseur de ces parois

en terre est en moyenne de 40 mm mais peut varier entre 30 et 80 mm. Les deux bases ont des dimensions similaires avec des diamètres interne et externe de 155 cm et 170 cm respectivement. La surface de chaque base est divisée en deux niveaux, avec deux marches (figure 3a) et avec les caractéristiques typiques d'un contact avec du métal en fusion qui se manifeste par une coloration noire due à des brûlures. Le moule B1 est bordé de trois cavités, ou petites fosses, d'une profondeur de 15 cm et de formes oblongues situées aux points cardinaux nord, est et ouest avec des longueurs conservées de 44 cm pour des largeurs de 34 et 28 cm. La couleur des parois est rouge et celle du fond est noire. Elles sont connectées à la base du moule par des conduits qui ont été bouchés par de la terre argileuse (figure 2f).

Les moules rectangulaires

Les bases de moules A2 et B2, découverts respectivement dans les fosses A et B, représentent la seconde phase de pro-

Figure 2 : (Voir planche couleur X) a) Moule circulaire A1; b) moule circulaire B1; c) moule rectangulaire A2; d) moule rectangulaire B2; e) cavités enduites d'argiles de A2; f) partie de base de moule prélevée de B1 avec une cavité (45 cm de long et 35 cm de large) et un conduit (15 cm) bouché par de la terre argileuse.
 Figure 2: (See colour plate X) a) Circular mold A1; b) circular mold B1; c) rectangular mold A2; d) rectangular mold B2; e) clay coated cavities of A2; f) a part of B1 mold base with its cavity and a channel blocked by clay.

duction (figure 2c et d). Le moule B2 présente une largeur de 181 cm, une longueur maximale conservée de 200 cm et une hauteur de 10 cm. La largeur du moule A2 est de 196 cm, sa longueur maximale conservée est de 201 cm et sa hauteur est de 10 cm. Les deux moules vides d'empreinte et de terre spécifique au milieu, présentent la forme de cadres d'une largeur de 35 cm pour A2 et de 38 cm pour B2. Les deux bases sont constituées d'un lit de fragments de terres cuites architecturales sur lequel est appliquée la terre argileuse formant l'empreinte de l'objet (figure 3b). Comme pour les bases de moule circulaires, la terre argileuse observée à partir des coupes de A2 et B2 présente une surface brûlée de couleur noire attestant du contact avec le métal en fusion.

La structure A2 est complètement vide à l'intérieur mais son côté nord est bordé à l'extérieur par deux cavités circulaires, de 29 et 35 cm de diamètre pour 11 cm de profondeur, dont les parois sont enduites d'une terre argileuse rouge présentant un fond de couleur noire (figure 2e).

Figure 3 : (Voir planche couleur X) Coupes montrant les profils d'un côté de la base de moules circulaire A1 (a) et d'un autre de la base de moule rectangulaire A2 (b). Ce dernier contient des fragments de terres cuites architecturales (T.C.A.). L'emplacement de chaque coupe est indiqué par deux flèches sur le plan de base de moule respectif.

Figure 3: (See colour plate X) Cross sections showing the profiles of one side from the circular mold base A1 (a) and another from rectangular mold base A2 (b). A2 exhibit large ceramic building material inclusions (designated as T.C.A.). The location of each cross-section is indicated by two arrows on the respective plan of mold base.

3. LES DÉCHETS LIÉS À L'ACTIVITÉ MÉTALLURGIQUE

Le site a livré plus de 165 kg de fragments de terre cuite dite « technique » et 2,6 kg de résidus en alliage à base de cuivre. Les terres cuites « techniques » peuvent être divisées en 5 catégories selon leur morphologie, leur aspect macroscopique et les traces d'utilisation (figures 4, 5 et 6). Nous distinguons des fragments de creusets en forme de bassin (98,3 kg), des moules (22,8 kg), des fragments plats (21,8 kg), des restes vitrifiés de forme indéterminée (0,7 kg) et des éléments en relation avec le four et le système de soufflerie (0,6 kg). De plus, ont été inventoriés à peu près 21 kg de fragments de terre cuite dont la fonction et l'appartenance sont demeurées indéterminées mais qui présentent une texture et une couleur ressemblant à celles des autres catégories.

Les fragments de creusets en forme de bassin sont caractérisés par des infiltrations et des billes en alliage à base de cuivre à partir de la paroi interne, cette surface étant plus ou moins vitrifiée. À la différence des surfaces internes cuites à très cuites, les parties externes de ces creusets-bassins sont très friables, suggérant que celles-ci sont peu ou pas cuites (figures 4b et 4c). L'inventaire systématique des fragments montre qu'ils appartiennent à au moins quatre creusets-bassins circulaires², profonds d'au moins 20 cm et à fond plat avec des diamètres de 20 à 60 cm à l'ouverture (figures 5a et 5c). Les parois présentent des épaisseurs conservées qui varient entre 5 et 15 cm (figures 4a, 4b, 5a et 5b). Les différences observées entre les parois internes et externes de ces fragments permettent donc de conclure que pour fondre du métal, la combustion se déroulait principalement à l'intérieur des creusets-bassins, probablement ventilés par des soufflets. Notons que l'un des fragments se particularise par une ouverture ou une perforation d'un diamètre compris entre 3 et 6 cm (figures 5c et 6e). La surface conservée est presque plate avec une surface vitrifiée, des billes métalliques et des infiltrations de métal. Du fait de la forme, de la texture et de la couleur de cet artefact particulier, il est possible de l'interpréter comme un fragment de fond de creuset-bassin. La plupart des restes de creusets-bassins proviennent des couches de remblais situées au-dessus des bases de moules rectangulaires et dans la fosse C (figure 7).

La morphologie des fragments de moules conduit à distinguer ceux qui sont associés à de grands moules, notamment

2. Le nombre minimal d'individus (NMI) des creusets-bassins a été calculé à partir du secteur angulaire conservé des bords. Les fragments ne permettent pas de reconstituer le profil complet des bassins surtout au niveau du fond. Les fragments provenant de cette partie n'ont donc pas pu contribuer à la détermination du NMI.

Figure 4 : (Voir planche couleur XI) a) Face interne d'un fragment de bord de creuset-bassin; b) vue du revers et du haut du même fragment; c) fragments de creuset-bassins présentant des faces internes vitrifiées; d) fragments de moules pour grands objets; e) fragments de moules allongés; f) fragments de moules pour petits objets (voir fig. 5D).

Figure 4: (See colour plate XI) a) Inner side of a crucible-basin rim fragment; b) same fragment seen from above and behind the rim; c) crucible-basin fragment showing vitrified areas on the inner side; d) fragments from molds used to cast large artefacts; e) fragments of elongated molds; f) fragments of molds used to cast small artefacts (see fig. 5D).

aux bases A1, A2, B1 et B2 (777 exemplaires), de ceux utilisés pour la coulée de petits objets (seulement 6 exemplaires). Ceux du premier type ne présentent que très rarement l'épaisseur complète, et correspondent dans la plupart des cas à la surface des parois de moule en contact avec le métal (figure 4d). Leur état trop fragmentaire ne permet pas de déterminer s'ils proviennent de la chape, partie externe du moule, ou du noyau, partie interne. Quatre fragments allongés et à surface plane pourraient provenir des parois des moules rectangulaires (figure 4f et 5E). Les fragments de moules de petits objets sont rares mais relativement bien préservés. Les empreintes des objets coulés sont cruciformes, annulaires, ovales ou encore en forme de fer à cheval (figure 4f et 5D). Toutes les surfaces de contact avec le métal sont noires et les surfaces externes sont rougeâtres. Un fragment présente une partie d'un canal d'alimentation de 3 cm de diamètre. D'autres, possédant des empreintes tubulaires, de 4 à 8 cm de

diamètre, correspondraient à des parties de canaux d'alimentation, ou d'évents pour les moules de grandes et de petites dimensions, et seraient destinés à faciliter l'échappement des gaz rejetés par le métal liquide quand il entre en contact avec le moule. Ce sont des éléments essentiels au bon remplissage du moule. La plupart de ces fragments ont été découverts dans les remblais des fosses A et B.

Les fragments plats, d'une épaisseur comprise entre 3 et 4 cm, ont souvent des surfaces rugueuses comportant parfois d'un seul côté des rainures circulaires d'une largeur entre 1 et 1,5 cm, ou rectilignes faites avec les doigts ou avec un outil. Certains, représentés par 38 exemplaires pour une masse totale de 6,9 kg, présentent des zones légèrement vitrifiées associées à des billes de métal (figure 6a). Ces observations permettent de proposer qu'ils faisaient très probablement partie des parois du four, au-dessus du creuset en forme de bassin. Cette identification est corroborée par la distribution stratigraphique de ces artefacts qui, comme les creusets-bassins, sont majoritairement issus des remblais situés au-dessus des bases de moules rectangulaires et de la fosse C (figure 7).

La catégorie de fragments de fours à associer au système de soufflerie est composée de quatre éléments caractérisés par leur aspect vitrifié et une morphologie particulière. Un fragment se distingue par sa forme en « L ». Complètement vitrifié, il pourrait constituer une partie d'une ouverture rectangulaire du four (figure 6b). Trois autres proviendraient d'une ou de plusieurs tuyères tronconiques (figure 6c et 6d).

La dernière catégorie est composée de restes vitrifiés de petites dimensions dont la fonction est non identifiable (figure 6f). L'association de ces résidus à l'activité métallurgique est confirmée par la présence d'inclusions de billes d'alliages cuivreux. Ils ont été produits par l'exposition de terres argileuses à de hautes températures et donc pourraient provenir du four, des tuyères ou encore des creusets-bassins.

L'examen du mobilier en alliage à base de cuivre permet de distinguer cinq catégories (figure 8) : les chutes de coulée (0,76 kg), les gouttes (0,2 kg), les coulures (0,42 kg), les infiltrations (0,28 kg) et les chutes de découpe (0,14 kg). Tous ces déchets ont été retrouvés dans les remblais au-dessus des bases de noyaux circulaires et rectangulaires des fosses A et B et dans la fosse C. Les fouilles ont livré également un raté de coulée (0,46 kg) et des résidus très corrodés non identifiables (0,062 kg). Les trois premières catégories sont composées de pertes de métal, survenues lorsque le métal en fusion circule durant les opérations de fusion et de coulée. Les infiltrations ont été formées par l'introduction du métal liquide dans les fissures des creusets-bassins ou des moules. Les chutes de découpes comprennent des fragments d'objets découpés, peut-être pour être recyclés, mais aussi des

Figure 5 : A) Profil d'une partie du fond et de la paroi d'un creuset-bassin; B) profil d'une paroi de creuset-bassin avec sa lèvre; C) fragment de fond de creuset-bassin avec une partie du bord de la perforation représenté en plan (gauche) et en coupe (droite); D) moule avec une empreinte en forme de fer à cheval ou ovale représentée en plan (en haut à gauche) et en coupe (en haut à droite) et moule avec empreinte circulaire en plan (en bas à gauche) et en coupe (en bas à droite) (voir figure 4f); E) profils des fragments de moules allongés.
 Figure 5: A) Profile of a fragment of the base and the body of a crucible-basin; B) profile of a fragment from the rim and body of the crucible-basin; C) cross-section (left) and plan (right) of a fragment from the base of a crucible-basin showing the rim of a perforation; D) plan (above to the right) and cross-section (above to the left) of a mold showing a horse-shoe or oval shaped imprint and a plan (below to the right) and cross-section (below to the left) of a mold with ring shaped imprint (see figure 4f); E) profiles of elongated mold fragments.

Figure 6 : (Voir planche couleur XI) a) Fragments plats; b) fragment vitrifié en forme de « L »; c) vue de face d'un fragment de tuyère vitrifié; d) vue de profil du même fragment de tuyère; e) fond de creuset-bassin vitrifié présentant une paroi d'un trou; f) fragments de terre cuite vitrifiés.

Figure 6: (See colour plate XI) a) Flat fragments; b) "L" - shaped vitrified fragment; c) front view of a vitrified tuyère fragment; d) profile view of the same tuyère fragment; e) vitrified crucible-basin showing a the rim of a hole; f) vitrified ceramic fragments.

bavures. Ces dernières ont été formées lors de l'infiltration du métal dans les fissures et les joints des moules. Elles sont éliminées de l'objet coulé par les opérations d'ébarbage.

Un raté de coulée a été découvert dans la fosse C (figure 8g et 8h). Il s'agit d'un fragment d'objet difficilement identifiable avec des restes de terre cuite provenant du moule, toujours adhérents au métal.

4. ÉCHANTILLONNAGE ET MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE DES MATÉRIAUX

Des examens et des analyses ont été effectués sur un échantillonnage représentatif afin de déterminer la composition des alliages et des terres cuites « techniques » et ainsi tenter de préciser leurs processus de fabrication et leurs utilisations.

Une soixantaine d'échantillons, représentant les trois fosses et les différentes phases de production, ont été prélevés à l'aide d'une scie d'horloger à partir des individus appartenant aux

différentes catégories de restes métalliques. Ces prélèvements ont été enrobés dans une résine monomère polymérisant à froid avant de subir un polissage. La composition de ces artefacts a été déterminée par un dispositif de spectroscopie X à dispersion d'énergie (EDXS) couplé à un microscope électronique à balayage (MEB). Cette méthode permet d'effectuer des analyses élémentaires qualitatives et semi-quantitatives. Sur chaque échantillon, nous avons analysé la plus grande surface possible de métal sain, en effectuant au moins 3 analyses globales. Typiquement, une zone d'analyse présente une superficie comprise entre 0,04 et 0,25 mm². Chaque valeur exprimée représente la moyenne des analyses globales effectuées sur un même échantillon (tableau 1). Tous les résultats d'analyses élémentaires sont normalisés à 100 et exprimés en pourcentage massique (% m).

Pour les terres cuites dites « techniques », une trentaine d'échantillons ont été prélevés. Ceux-ci incluent huit individus provenant des creusets-bassins, neuf des parois de moules, quatre des bases de moules A1, B1, A2 et B2, un fragment de canal d'alimentation, deux éléments plats, un fragment de tuyère, un autre vitrifié en forme de « L » et trois provenant de l'enduit d'argile des cavités de A2 et de B1. Ces échantillons ont été préparés en lames minces pour réaliser des examens pétrographiques et en lames épaisses pour des examens à la loupe binoculaire suivis d'analyses élémentaires par MEB-EDXS. Comme pour le métal, nous avons analysé la plus grande surface possible de l'échantillon en effectuant au moins cinq mesures globales de la matrice de terre en évitant les inclusions. Cependant, du fait de l'hétérogénéité de ces matériaux, des disparités importantes ont été observées entre les compositions des différentes zones analysées d'un même échantillon, particulièrement dans le cas des échantillons riches en inclusions de chaux ou de calcite de grande dimension comme pour les creusets-bassins. Dans le but de mettre en évidence l'apparition ou la disparition de phases liées à la chauffe, des analyses structurales par diffraction de Rayons X (DRX) ont été réalisées sur des fractions prélevées par raclage des différentes couches visibles sur les échantillons et réduites en poudre. L'étude par diffraction de rayons X a été effectuée sur trois prélèvements appartenant à un creuset-bassin (BDX15436), un fragment de moule (BDX15540) et à la base de moule A1 (BDX15437). Toutes ces analyses ont été faites au moyen d'un diffractomètre (Bruker, D8 Advance, Anticathode Cu), en configuration Bragg-Brentano (40 mA, 40 kV), selon deux modes opératoires complémentaires :

- Une analyse sur poudre globale, avec un domaine angulaire exploré compris entre 3° et 60° (2θ) et un pas de 0,02° pendant 2 s. Cette méthode a été appliquée uniquement sur trois échantillons.

Figure 7 : Distribution, en masse (g) et en nombre, des fragments de différentes catégories de terre cuite « techniques » selon les ensembles stratigraphiques suivant : les couches au-dessus des trois fosses (C.C) ; les remblais situés dans la fosse A au-dessus de A2 (Phase A2) ; les remblais situés dans la fosse A au-dessus de A1 mais au-dessous de A2 (Phase A1) ; les remblais situés dans la fosse B au-dessus de B2 (Phase B2) ; les remblais situés dans la fosse B au-dessus de B1 mais au-dessous de B2 (Phase B1) ; les remblais de la fosse C (Fosse C) ; les couches de SFI654 qui ne sont pas en connexion stratigraphique directe avec les fosses de coulée (CSC).

Figure 7: Distribution of the fragmented remains of different technical ceramics categories, represented by their weight (g) and number, according to the stratigraphic groups: the layers over the three pits (C.C); the layers in pit A situated over A2 (phase A2); the layers in pit A situated over A1 but under A2 (phase A1); the layers in pit B situated over B2 (phase B2); the rubble in pit B situated over B1 but under B2 (phase B1); the layers inside pit C; the layers of SFI654 that are without a direct stratigraphic connection with the casting pits (CSC).

– Une analyse de cette même poudre mise en suspension dans l'eau et déposée sur une lame de verre, avec un domaine angulaire exploré compris entre 3° et 30° (2θ), un pas de 0,01° pendant 2 s. Cette analyse complémentaire sur lame orientée a été utilisée pour déterminer les minéraux argileux détectés par l'analyse sur poudre. Ce type de caractérisation a été effectué en appliquant les traitements habituels pour la détermination des minéraux argileux (Éthylène-glycol, chauffage à 110 °C, 350 °C et 550 °C).

5. RÉSULTATS

Les alliages cuivreux

Les analyses élémentaires par MEB-EDXS montrent que la plupart des échantillons en alliage à base de cuivre sont des bronzes au plomb (figures 9a et 9b; tableau 1). Ils présentent des teneurs en étain qui varient entre 2 et 14 % m mais la plupart des échantillons, soit 80 %, en contiennent entre 7 et 9 % m. Les teneurs en plomb ne montrent pas de tendances particulières et varient entre 1 et 24 % m. Une telle dispersion a également été observée pour les chutes métalliques provenant de sites similaires, en particulier pour le site JEM003, à Beyrouth, et pour celui de Fréjus, en France

Figure 8 : (Voir planche couleur XII) Restes en alliages cuivreux dont une chute de coulée (a), une goutte (b), une coulure (c), des infiltrations (d), des chutes de découpe (e), un fragment d'un objet découpé (f) et un raté de fabrication (g et h).

Figure 8: (See colour plate XII) Copper base alloy remains including casting waste (a), a droplet (b), a spill (c), infiltrations (d), fettling remains (e), fragment of an artefact that has been cut (f) and fragment of a failed casting (g and h).

(figure 9c; El Morr, à paraître; Thomas *et al.*, 2012). Celle-ci peut être due aux conditions d'analyses et à l'insolubilité du plomb dans le cuivre en phase solide, tout comme aussi à l'élaboration des alliages. La composition du raté de fabrication est probablement la plus proche de celle des recettes d'alliages cuivreux utilisées par les artisans du site considéré (SFI654). Avec 9 % m d'étain et 5 % m de plomb, l'alliage utilisé pour la fabrication de cet artefact est très fluide par rapport à d'autres compositions de bronze (Amendola, 2010; figure 6.10, 6.14, 6.18). Les résultats des analyses ne permettent pas de distinguer de différences claires dans les

alliages utilisés par phase d'activité (figure 9a). Étant donné que la plupart des chutes en métal contiennent des teneurs en étain assez peu dispersées, il est probable que la même recette ait été utilisée pour toute la production de ce site.

Les terres cuites

Tous les échantillons de terre cuite dite « technique », provenant aussi bien des creusets-bassins que des moules, montrent que ces terres proviennent d'une argile carbonatée riche en bioclastes, principalement des foraminifères (tableau 3). L'analyse structurale par DRX des parties peu cuites des trois échantillons (creuset, moule et base de moule) a mis en évidence la présence de quartz, de calcite et de minéraux argileux, smectite et kaolinite. La présence de ces derniers indique que la terre n'a pas été soumise à une température élevée ou bien seulement pendant une durée relativement brève, du moins dans les parties analysées. Les matrices des pâtes argileuses sont calciques avec des teneurs comprises entre 35 et 55 % m. Les concentrations en silice se situent entre 29 et 45 % m, alors que les valeurs pour l'alumine apparaissent moins dispersées entre 8 et 12 % m (figure 9d; tableau 2). Les pâtes présentent toutes des inclusions réparties de manière hétérogène de quartz, de calcite, de chaux recarbonatée et très occasionnellement des empreintes de fibres végétales. Au vu de la rareté des inclusions organiques, l'utilisation volontaire de ce type de dégraissant est à écarter, du moins de façon systématique.

Les différentes catégories de terres cuites se distinguent les unes des autres par la répartition et la quantité de certaines inclusions, la présence de vitrifications et d'infiltrations d'alliage cuivreux. Dans toutes les catégories sauf les creusets-bassins, le quartz est présent dans des quantités importantes. De plus, ces inclusions sont généralement de tailles similaires, autour de 300 µm, et dispersées d'une manière homogène à travers la section de l'échantillon qui représente l'épaisseur complète de l'élément prélevé (figures 10c et 10d).

En revanche, les creusets-bassins contiennent relativement peu de quartz mais présentent plus d'inclusions de nodules de calcite micritique, dont la taille est entre 100 et 150 µm, et de chaux recarbonatée finement recristallisée de tailles variées, de 1 à 3 mm. Leur répartition est hétérogène, surtout dans les couches proches des parois internes qui ont été en contact avec le métal en fusion ou au plus proche du feu. Ainsi la présence de ces inclusions sous cette forme pourrait être due à l'exposition à de hautes températures, au moins supérieures à 800 °C, de la paroi interne. Ces terres ne sont probablement pas travaillées, du moins par des ajouts volontaires de dégraissants (figures 10a et 10b). Cependant,

catégorie	Ctxt	N° échantillon	poids (g)	analy.	S	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Ag	Sn	Sb	Au	Pb	Bi	structure de grains
gouttes	103	BDX15375	1,6	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	75,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,9	n.d.	n.d.	15,6	n.d.	brut de coulée
	103	BDX15376	1,5	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	83,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9,1	n.d.	n.d.	7,2	n.d.	brut de coulée
	159	BDX15385	1,6	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	82,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,5	n.d.	n.d.	9,2	n.d.	brut de coulée
	173	BDX15386	1,0	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	80,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,6	n.d.	n.d.	11,0	n.d.	brut de coulée
	115	BDX15387	1,1	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	82,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7,2	n.d.	n.d.	10,7	n.d.	brut de coulée
	173	BDX15389	0,8	3	det	det	n.d.	n.d.	89,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,6	n.d.	n.d.	1,5	n.d.	brut de coulée
	260	BDX15392	0,8	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	89,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,2	n.d.	n.d.	2,2	n.d.	brut de coulée
	386	BDX15393	0,4	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	85,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7,1	n.d.	n.d.	7,4	n.d.	brut de coulée
	159	BDX15401	3,7	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	88,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,9	n.d.	n.d.	2,6	n.d.	brut de coulée
	159	BDX15402	1,2	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	87,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,9	n.d.	n.d.	3,4	n.d.	brut de coulée
	163	BDX15404	0,6	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	77,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9,1	n.d.	n.d.	13,5	n.d.	brut de coulée
	163	BDX15405	2,5	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	74,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,4	n.d.	n.d.	16,7	n.d.	brut de coulée
	173	BDX15408	2,7	3	n.d.	1,0	n.d.	n.d.	65,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,9	n.d.	n.d.	24,1	n.d.	brut de coulée
coulures	109	BDX15373	5,9	6	n.d.	det	n.d.	n.d.	80,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7,7	n.d.	n.d.	11,4	n.d.	brut de coulée
	192	BDX15383	2,3	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	90,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7,5	n.d.	n.d.	2,3	n.d.	brut de coulée
	163	BDX15410	6,1	6	n.d.	det	n.d.	n.d.	79,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10,3	n.d.	n.d.	9,9	n.d.	brut de coulée
	138	BDX15413	9,9	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	83,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9,0	n.d.	n.d.	7,8	n.d.	brut de coulée
	138	BDX15414	10,4	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	71,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9,1	n.d.	n.d.	19,1	n.d.	brut de coulée
	386	BDX15415	5,2	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	68,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,4	n.d.	n.d.	23,4	n.d.	brut de coulée
	334	BDX15418	16,9	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	89,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7,9	n.d.	n.d.	2,7	n.d.	brut de coulée
	329	BDX15421	2,4	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	84,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,7	n.d.	n.d.	6,8	n.d.	brut de coulée
	347	BDX15422	4,4	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	89,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7,9	n.d.	n.d.	2,9	n.d.	brut de coulée
	172	BDX15423	3,4	9	det	det	n.d.	n.d.	93,2	n.d.	n.d.	n.d.	det	5,7	n.d.	0,9	n.d.	n.d.	brut de coulée
	159	BDX15424	31,5	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	72,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7,5	n.d.	n.d.	20,5	n.d.	brut de coulée
	159	BDX15425	10,6	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	73,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10,7	n.d.	n.d.	15,5	n.d.	brut de coulée
	198	BDX15427	8,2	4	n.d.	det	n.d.	n.d.	74,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9,1	n.d.	n.d.	15,9	n.d.	brut de coulée
	347			3	n.d.	det	n.d.	n.d.	80,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12,8	n.d.	n.d.	6,5	n.d.	non disponible
	386		49,2	3	det	det	n.d.	n.d.	86,9	det	n.d.	n.d.	n.d.	9,3	n.d.	n.d.	3,5	n.d.	non disponible
chutes de découpe	346	BDX15390	3,1	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	82,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,6	n.d.	n.d.	8,7	n.d.	écroui
	335	BDX15394	2,5	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	87,1	n.d.	n.d.	n.d.	det	9,5	n.d.	n.d.	3,0	n.d.	non disponible
	163	BDX15406	0,5	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	75,6	n.d.	n.d.	n.d.	det	9,5	n.d.	n.d.	14,8	n.d.	écroui
	138	BDX15412	26,0	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	79,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,1	n.d.	n.d.	12,0	n.d.	non disponible
	173	BDX15416	13,5	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	72,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	13,8	n.d.	n.d.	13,2	n.d.	écroui
	192	BDX15428	3,9	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	89,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6,0	n.d.	n.d.	3,9	n.d.	écroui
	109	BDX15372	3,4	5	n.d.	det	n.d.	n.d.	84,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,0	n.d.	n.d.	6,6	n.d.	écroui
	334	BDX15419	1,6	3		n.d.	n.d.	n.d.	88,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9,0	n.d.	n.d.	2,7	n.d.	brut de coulée
chutes de coulée	192	BDX15384	1,2	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	84,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9,1	n.d.	n.d.	5,8	n.d.	brut de coulée
	159	BDX15403	0,6	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	85,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,5	n.d.	n.d.	5,4	n.d.	brut de coulée
infiltrations	335	BDX15395	12,6	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	90,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,0	n.d.	n.d.	8,0	n.d.	brut de coulée
	163	BDX15411	4,3	9	n.d.	det	n.d.	n.d.	74,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,9	n.d.	n.d.	16,3	n.d.	brut de coulée
	198			3	n.d.	det	n.d.	n.d.	82,9	n.d.	n.d.	n.d.	det	10,0	n.d.	n.d.	6,7	n.d.	brut de coulée
	173		45,0	3	n.d.	det	n.d.	n.d.	83,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9,3	n.d.	n.d.	6,9	n.d.	brut de coulée
	158	BDX15431		3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	83,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6,8	n.d.	n.d.	10,1	n.d.	non disponible
	115	BDX15432		3	n.d.	det	n.d.	n.d.	90,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4,4	n.d.	n.d.	5,1	n.d.	non disponible
	173	BDX15433		3	n.d.	det	n.d.	n.d.	85,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10,4	n.d.	n.d.	3,9	n.d.	non disponible
	163	BDX15434		3	n.d.	det	n.d.	n.d.	81,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12,4	n.d.	n.d.	5,8	n.d.	non disponible
	105	BDX15435		3	n.d.	det	n.d.	n.d.	91,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6,7	n.d.	n.d.	2,0	n.d.	non disponible
raté de coulée	109		465	4	det	det	n.d.	n.d.	86	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,6	n.d.	n.d.	5,0	n.d.	brut de coulée

ctxt : numéro de contexte/unité stratigraphique ; N°échantillon : numéro d'échantillon attribué par l'IRAMAT-CRPA ; det : élément détecté mais présent à des teneurs inférieures à 0,5 % m ; analy : le nombre d'analyses globales effectuées ; n.d. : non détecté

Tableau 1 : Composition des échantillons en alliage de cuivre. Chaque valeur est exprimée en pourcentage massique (% m) et représente la moyenne de toutes les analyses effectuées sur le même échantillon.

Table 1: Copper base alloy sample composition. Each result is expressed in weight percentage and represents the mean of all the analyses undertaken on the same sample.

Figure 9 : Teneurs en plomb et en étain des échantillons en métal selon leurs distributions stratigraphiques a), leurs catégories b) et comparées c) à des résultats similaires de JEM003 et Fréjus (Thomas *et al.*, 2012); d) teneurs en CaO et en SiO₂ des matrices des échantillons en terre cuite selon leurs catégories.

Figure 9: Diagrams of the composition in lead and tin of the metal samples represented as per their stratigraphic distribution a), their categories b) and compared c) to samples from JEM003 and Fréjus (Thomas *et al.*, 2012); d) composition in CaO and SiO₂ of the matrices of technical ceramic samples represented per their categories. All results are expressed in weight percentage.

des couches minces, de 1 à 2 mm, présentant un ajout de quartz sont parfois attestées au niveau de la surface interne ou à l'intérieur même des creusets-bassins. Les échantillons sont caractérisés par des infiltrations de métal et des vitrifications plus ou moins importantes. Les analyses élémentaires montrent que six des huit échantillons de creusets-bassins présentent de 41 à 48 % de CaO en masse pour 32 à 39 % de silice. Les deux échantillons restants (BDX 15436 et 15432) ont des compositions différentes avec 31 et 56 % m de CaO (tableau 2).

Les échantillons de moules sont tous, sauf celui de la base du moule A1, dégraissés volontairement au quartz qui occupe plus de 50 % du volume de la terre et présente une répartition homogène (figure 10c et 10d). Cette estimation

a été effectuée visuellement à l'aide de chartes graphiques (Terry et Chilingar, 1955; Matthews et Wood, 1991). Les matrices des pâtes argileuses présentent, sauf exception, entre 40 et 45 % m de CaO et entre 35 et 41 % m de SiO₂.

Les échantillons représentant les autres types de terre cuite, principalement des éléments de four, sont également tous dégraissés volontairement avec du quartz bien calibré, comme pour la plupart des moules. La composition élémentaire n'est pas très différente de celle des fragments de moules.

La répartition et les dimensions homogènes du quartz dans les moules et les autres catégories conduisent à la conclusion que celui-ci a été ajouté volontairement après avoir subi un tri granulométrique.

catégorie	ctxt	N° échantillon	analy.	Na ₂ O	σ	MgO	σ	Al ₂ O ₃	σ	SiO ₂	σ	P ₂ O ₅	σ	SO ₃	σ	K ₂ O	σ	CaO	σ	TiO ₂	σ	MnO	σ	Fe ₂ O ₃	σ
creuset	163	BDX15429	15	det		1,3	0,2	10,5	0,9	32,4	2,9	det		det		0,9	0,1	48,0	2,6	0,9	0,5	n.d.		5,2	0,9
	159	BDX15430	9	det		1,4	0,7	9,7	1,7	36,2	6,5	det		det		0,7	0,1	45,4	8,7	0,8	0,5	n.d.		5,1	0,9
	138	BDX15431	6	n.d.		1,2	0,1	9,2	0,8	33,6	5,8	det		1,0		0,7	0,2	47,8	7,0	0,7	0,2	n.d.		5,4	1,0
	115	BDX15432	10	det		2,8	0,7	12,1	1,1	44,2	3,4	det		1,3		1,0	0,2	30,5	4,4	0,9	0,2	n.d.		6,6	0,7
	173	BDX15433	6	n.d.		1,1	0,4	10,0	1,0	35,6	3,4	det		0,8	0,5	0,8	0,6	45,8	4,6	1,0	0,5	n.d.		4,5	0,5
	163	BDX15434	13	det		1,2	0,3	9,5	2,5	35,1	7,1	det		1,0	0,5	0,6	0,3	46,7	8,1	0,7	0,2	n.d.		4,7	1,2
	105	BDX15435	18	det		2,4	2,1	9,5	3,2	38,5	11,4	det		1,0	0,4	0,7	0,3	40,8	14,8	0,7	0,4	n.d.		5,5	1,0
	192	BDX15436	15	det		1,0	0,5	8,3	2,1	28,6	5,3	det		det		0,7	0,2	56,2	9,0	0,6	0,2	n.d.		4,0	1,4
	369	BDX15437	9	det		2,2	0,4	9,0	1,3	32,9	2,6	det		det		0,7	0,1	50,8	4,0	0,6	0,1	n.d.		3,3	0,7
	313	BDX15438	13	det		1,2	0,3	9,0	0,9	37,6	6,6	det		det		0,9	0,2	43,9	6,5	1,3	1,3	n.d.		5,0	1,0
	313	BDX15439	12	det		1,8	0,2	10,1	0,9	35,5	3,5	det		det		0,8	0,1	44,3	3,3	0,8	0,1	n.d.		6,0	0,7
	163	BDX15440	7	det		1,6	0,3	10,6	1,1	37,8	2,8	det		n.d.		0,9	0,3	42,8	3,0	0,7	0,2	n.d.		5,2	1,1
	163	BDX15442	7	det		1,6	0,2	11,2	0,6	35,4	3,3	det		det		1,3	0,8	43,0	4,3	0,8	0,1	n.d.		5,7	0,9
	317	BDX15443	8	det		1,6	0,2	11,5	0,7	36,5	3,1	det		det		0,7	0,1	42,8	3,0	0,7	0,1	n.d.		5,3	0,4
	301	BDX15444	6	det		1,2	0,2	10,6	1,2	38,9	7,3	det		det		1,0	0,3	41,1	7,9	0,8	0,3	n.d.		5,4	0,2
base de moule A1	424	BDX15564	19	det		1,8	0,2	10,8	1,0	39,4	3,5	det		det		0,7	0,1	41,4	4,6	0,7	0,1	n.d.		4,6	0,4
	239	BDX15565	25	det		1,8	0,2	11,2	1,6	38,8	5,6	det		det		0,8	0,4	41,2	6,3	0,7	0,2	n.d.		5,1	0,5
	238	BDX15566	11	det		1,7	0,3	11,6	1,2	37,5	4,6	det		det		0,8	0,2	42,2	4,5	0,7	0,1	n.d.		4,9	0,3
	173	BDX15570	6	det		1,6	0,2	10,9	1,0	39,5	4,3	det		n.d.		0,6	0,1	41,3	3,9	0,8	0,3	n.d.		4,9	0,7
	173	BDX15571	6	det		1,6	0,1	10,4	0,8	41,3	4,6	det		n.d.		0,6	0,1	40,4	4,3	0,6	0,1	n.d.		4,7	0,2
	173	BDX15572	17	det		1,7	0,1	10,8	1,1	37,5	4,1	det		det		0,5	0,1	43,5	4,6	0,7	0,4	n.d.		4,6	0,7
	277	BDX15441	5	det		1,4	0,2	9,6	0,5	34,5	4,5	det		det		0,7	0,1	47,9	5,4	0,6	0,1	n.d.		4,7	0,5
	115	BDX15445	6	det		1,2	0,9	10,7	1,4	37,7	4,8	det		det		0,9	0,2	41,7	7,5	0,9	0,2	n.d.		5,9	0,9
	173	BDX15446	13	det		1,1	0,5	10,8	2,3	32,7	4,2	det		det		0,4	0,1	49,0	5,1	0,6	0,1	n.d.		4,7	0,8
	163	BDX15447	7	det		1,9	0,8	10,8	1,8	36,9	3,0	det		det		0,8	0,3	43,0	0,7	0,7	0,2	n.d.		5,5	1,1
	163	BDX15448	7	det		1,4	0,3	10,0	0,6	31,7	2,8	det		det		0,8	0,1	50,0	3,6	0,7	0,1	n.d.		5,0	0,3
	290	BDX15567	6	det		1,5	0,2	11,6	1,9	40,2	5,7	det		det		0,8	0,1	39,2	5,9	0,7	0,1	n.d.		5,2	0,7

ctxt : numéro de contexte / unité stratigraphique
N°échantillon : numéro s'échantillon attribué par l'IRAMAT-CRPAA
det : élément détecté mais présent à des teneurs inférieures à 0,5 % m
analy : le nombre d'analyses globales effectuées
n.d. : non détecté
σ : écart type

Tableau 2 : Compositions des échantillons de terres cuites dites « techniques ». Chaque valeur en gris est exprimée en pourcentage massique (% m) et représente la moyenne de toutes les analyses effectuées sur le même échantillon.
Table 2: Technical ceramic samples composition. Results in the grey columns are expressed in weight percentage and represents the mean of all the analyses undertaken on the same sample.

catégorie	N° échantillon	% inclusions non plastiques ¹	tri granulométrique ²	taille moyenne	inclusions dominantes	autres inclusions	matrice	particularités
creuset	BDX1 5429	-	moyen	70 µm	NRC; NCM	quartz, fibres	foraminifères, fragments d'oursins	empreintes de fibres
	BDX1 5430	+	moyen	350 µm	NRC; NCM	quartz, fibres	foraminifères, algues	paroi interne vitrifiée, beaucoup de porosités, cristaux néoformés
	BDX1 5431	-	mauvais	200 µm	NRC; NCM	quartz		métal sur la paroi interne et présence de cristaux de néoformation et beaucoup de porosités parallèles à la surface
	BDX1 5432	-	mauvais	250 µm	NRC; NCM	quartz		présence d'infiltrations de métal et de couches minces (1 à 2 mm d'épaisseur) riche en quartz à certains endroits de la paroi interne
	BDX1 5433	+	mauvais	250 µm	NRC; NCM	quartz		infiltration de métal
	BDX1 5434	+	mauvais	150 µm	quartz; NRC; NCM		foraminifères	la paroi interne présente beaucoup de minéraux néoformés en contact du métal et des zones vitrifiées
	BDX1 5435	-	mauvais	200 µm	NRC; NCM	quartz	foraminifères	présence d'infiltrations de métal et de couches minces (1 à 2 mm d'épaisseur) riche en quartz à certains endroits de la paroi interne
	BDX1 5436	+	moyen	200 µm	NRC; NCM	quartz		
	BDX1 5437	+	mauvais	250 µm	quartz; NRC		foraminifères entiers + débris	concentration de grains de quartz dans une couche au centre de la terre cuite
	BDX1 5438	+++	très bon	300 µm	quartz		foraminifères	
moule	BDX1 5439	+++	très bon	350 µm	quartz		foraminifères	
moule plat	BDX1 5440	+++	très bon	350 µm	quartz	SM; NCR	foraminifères entiers + débris	
moule plat	BDX1 5442	+++	très bon	300 µm	quartz	fibres?	foraminifères	
moule plat	BDX1 5443	+++	très bon	300 µm	quartz	SM; NCR; tourmaline; zircon; fibres?	foraminifères	
petit moule	BDX1 5444	+++	très bon	300 µm	quartz	SM; NCR	foraminifères	
base B1	BDX1 5564	+++	très bon	300 µm	quartz		foraminifères, fragments d'oursins, algues?	
base A2	BDX1 5565	+++	très bon	300 µm	quartz	OF; NCR	foraminifères	
base B2	BDX1 5566	+++	très bon	300 µm	quartz	NCR; 1 frag. RVM; fibres	foraminifères	empreintes de fibres
moule	BDX1 5570	+++	très bon	300 µm	quartz		foraminifères, fragments de coquilles (bivalves?)	
moule	BDX1 5571	+++	très bon	300 µm	quartz	NCR	foraminifères	
moule	BDX1 5572	+++	très bon	300 µm	quartz	NCR; SM	foraminifères	
conduit	BDX1 5441	+++	bon	300 µm	quartz		foraminifères	début de vitrification à plusieurs endroits
fragment en "L"	BDX1 5445							complètement vitrifié / cristaux de néoformation
fragment plat	BDX1 5446	++	moyen	200 µm	quartz		peu de foraminifères	
fragment plat	BDX1 5447	++	mauvais	300 µm	quartz			
tuyère	BDX1 5448	++	moyen	300 µm	quartz		foraminifères, algues	couche vitrifiée en surface avec quelques cristaux de néoformation
cavité A2	BDX1 5567	+++	bon	300 µm	quartz	NCR	foraminifères	
cavité B1	BDX1 5568	+++	très bon	300 µm	quartz			% quartz très élevé / très peu de matrice
cavité B1	BDX1 5569	+++	très bon	300 µm	quartz			% quartz très élevé / très peu de matrice

1 : Estimation visuelle à l'aide de chartes graphiques (Terry et Chilingar, 1955; Matthews *et al.*, 1991) +++ (supérieur à 50 %), ++ (40-50 %), + (20-30 %), - (<5 %)

2 : Estimation visuelle à l'aide de la charte de Pettijohn *et al.*, 1973

NRC : nodule de chaux recarbonatée; NCM : nodule calcite micritique; SM : silice microcristalline; OF : oxyde de fer; RVM : roche volcanique microlithique

N°échantillon : numéro d'échantillon attribué par l'IRAMAT-CRPA

La taille des nodules de chaux recarbonatée et de calcite micritique présents dans le bassin dans des proportions inférieures à 5 % vol. est mentionnée dans le texte

Tableau 3 : Bilan des observations pétrographiques effectuées sur chaque échantillon de terre cuite dite « technique ».

Table 3: Report of the petrographic observation performed on each technical ceramic sample.

Figure 10 : (Voir planche couleur XIII) Comparaison entre un échantillon de creuset-bassin, BDX15435, préparé en lame mince (en haut a et b) et un autre, BDX15444, de moule (en bas c et d) montrant une différence importante dans le nombre et la taille des grains de quartz. A gauche les deux échantillons sont observés sous lumière transmise polarisée non-analysée (a et c) et à droite sous lumière transmise polarisée analysée (b et d).

Figure 10: (See colour plate XIII) Comparison between the thin sections of sample BDX15435 extracted from a basin (a and b) and sample BDX15444, from a mold (c and d) showing a clear difference in the quantity and the size of quartz grains. The samples were observed in plane polarized light (a and c) and cross-polarized light (b and d).

6. DISCUSSION

L'ensemble des données permet de reconstituer en partie le savoir-faire des artisans et de comparer les premières interprétations aux quelques rares ateliers retrouvés ailleurs.

Les fragments plats vitrifiés conduisent à proposer l'usage d'un four avec une partie, au moins, de forme parallélépipédique ou cubique. Celle-ci remplissait peut-être le rôle d'une cheminée et servait à maintenir le charbon de bois au-dessus du creuset-bassin (figure 11). La combustion qui s'y déroulait était entretenue par un système de soufflerie comprenant des tuyères. La vitrification et la forte infiltration d'alliages à base de cuivre observées sur les parois internes des fragments de creusets-bassins montrent que ces récipients ont été utilisés pour fondre l'alliage à base de cuivre avec un foyer disposé directement au-dessus. La présence de phases encore argileuse dans l'épaisseur et la fragilité des parois externes des bassins confirment que ceux-ci étaient peu ou non cuits avant leur utilisation et que c'est pendant la fusion du métal que la cuisson de la terre est intervenue depuis leur surface interne vers l'intérieur de leur paroi. Ceci aboutit à proposer que les bassins ont été utilisés pour un nombre très

limité de coulées, peut-être même une seule, compte tenu du fait des vitrifications très localisées. Cette proposition est cohérente avec les piètres qualités réfractaires de la terre utilisée, probablement une marne locale, calcique. Par rapport à d'autres creusets de la période romaine, elle est pauvre en silice et surtout en alumine qui sont nécessaires pour conférer au matériau une bonne aptitude à conserver des propriétés mécaniques adéquates à haute température (König et Serneels, 2013; Bayley et Rehren, 2007; Freestone, 1989). Ainsi, la terre des creusets-bassins apparaît peu adaptée à ce type de fonction ce qui conduit à penser qu'ils ne pouvaient pas être déplacés pour verser le métal liquide dans le moule. Le fragment de fond de creuset-bassin présentant une perforation est la seule information pertinente livrée par le site sur le mode de transport possible du métal liquide du creuset-bassin vers le moule. Dans cette hypothèse, cette perforation pourrait être l'ouverture d'un canal d'alimentation, située dans le fond, et bouchée par un tampon de terre retiré, ou détruit, juste avant la coulée. L'étude des restes montre que les creusets-bassins étaient capables de contenir, selon leur taille, entre 2 et 22 litres, soit approximativement entre 20 et 200 kg de métal liquide. Ces valeurs ont été obtenues en prenant en compte la hauteur maximale préservée, de 20 cm, des parois, ainsi que le diamètre au niveau de la lèvre qui varie entre 20 cm pour le plus petit et 60 cm pour le plus grand. Pour calculer leurs volumes nous avons considéré que les bassins avaient une forme légèrement tronconique. Cette supposition est fondée sur la forme des fonds de bassins reconstitués, mais aussi sur la découverte à Gerasa en Jordanie d'un fragment similaire présentant le profil complet d'un bassin de fusion (Khalil *et al.*, 2013). D'autre part, ces calculs ont été effectués en considérant que les creusets-bassins étaient remplis à moitié seulement.

L'ensemble de ces données permet de supposer que la fusion était réalisée dans une structure du type four à bassin où le creuset est ouvert et probablement inamovible (figure 11). Le foyer, alimenté en air par un ou plusieurs soufflets se trouvait directement sur le creuset-bassin, non en dessous, ni sur les côtés. Le moule était probablement alimenté en métal liquide par gravité durant la coulée au moyen d'un canal. L'utilisation d'une ou plusieurs louches en fer lutées pour transporter le métal au moule demeure possible, mais aucun indice ne permet de confirmer l'utilisation d'un tel outil. Les données archéologiques sur les fours à bassin de la période romaine sont assez rares. Il faut citer les fragments de Gerasa, en Jordanie, datant de la 2^e moitié du II^e siècle apr. J.-C. et ceux du site du Collège de France, à Paris, daté de la fin du II^e ou du début III^e siècle apr. J.-C. (Khalil *et al.*, 2013; Guyard, 2003). D'autres découvertes plus anciennes proviennent d'Athènes et datent du VI^e siècle av. J.-C. (Mattusch,

Figure 11 : (Voir planche couleur XIII) a) Restitution d'une possible configuration des différents éléments utilisés durant la coulée dont la fosse de coulée, l'entonnoir de coulée du moule circulaire, le canal d'alimentation et le four à bassin avec son bassin-creuset, sa cheminée et une de ses deux tuyères. Le moule circulaire situé à l'intérieur de la fosse est couvert par des remblais. b) Coupe montrant le moule circulaire installé dans la fosse de coulée en plus des éléments visibles dans l'illustration précédente. Dans cette proposition le noyau du moule est vide mais d'autres possibilités existent. c) Vue de dessus de la fosse de coulée sans les remblais, du four à bassin avec ses deux tuyères, du moule circulaire et du canal d'alimentation.

Figure 11: (See colour plate XIII) a) restitution of a possible configuration of the different casting elements including the casting pit, the pouring cup of a circular mold covered here by the fill of the pit, the canal connecting the furnace to the mold, the furnace with its crucible-basin, its chimney and one of its two tuyères. b) Section showing the circular mold inside the casting pit as well as the casting elements visible in the former illustration. In this configuration the mold core is hollow but other possibilities might exist. c) Casting elements seen from above include the furnace with its two tuyères, the canal, the circular mold and the casting pit without the fill.

1982, 1977). Ces restes ont permis de reconstituer les profils complets des bassins utilisés sur chaque site. Ceux de Gerasa ont des parois droites et ressemblent plus aux vestiges de Beyrouth. Les fragments retrouvés à Athènes présentent des parois plus courtes et inclinées, avec une forme plus ouverte. Au Collège de France, il faut remarquer la présence des restes d'un canal d'alimentation utilisé pour conduire le métal par gravité depuis le four vers le moule.

Des bases de moules circulaires similaires à ceux des phases A1 et A2 ont été retrouvées en France, en Jordanie et au Liban. Ces vestiges attestent l'association fréquente de ces structures avec des thermes ou des sanctuaires (El Morr, à paraître; Khalil *et al.*, 2013; Grandieux, 2005; Guyard, 2003; Thomas *et al.*, 2012). En France, elles ont été découvertes sur le site du Collège de France à Paris (fin du I^{er}-début III^e siècle apr. J.-C.), à Nice-Cimiez et à Fréjus (2^e moitié du II^e-III^e siècle apr. J.-C.). Le premier était probablement équipé d'un conduit rectangulaire au-dessous de la base servant de foyer pour sécher, décirer et cuire le moule. Sur les deux derniers, celui-ci a été remplacé par un conduit cruciforme qui abritait un foyer ou servait à faire circuler de l'air chaud. Au-dessous de la base de moule de Fréjus, il y avait quatre cavités, comme à Beyrouth probablement, du moins pour les bases des moules B1 et A2. En Jordanie, à Gerasa, deux bases de moules circulaires datant de la 2^e moitié du II^e siècle apr. J.-C. ont été retrouvées dans le temple de Zeus, mais sans dispositif particulier semble-t-il. Au Liban des bases de ce type ont été dégagées sur les parcelles voisines JEM002 et JEM003. Un noyau de moule quasiment intact découvert sur ce dernier site permet de postuler que ces moules étaient utilisés pour produire des récipients de grandes dimensions comme des vasques ou de grands chaudrons à mettre peut-être en relation avec la vocation thermique du lieu. Ces grands moules rappellent tant par leur morphologie que leurs dimensions, ceux utilisés pour la coulée des cloches médiévales et sont constitués d'un noyau et d'une chape correspondant respectivement aux parties interne et externe de l'objet coulé (Neri, 2006; El Morr, à paraître).

L'association de la coulée de grands bronzes et d'éléments plus petits observés à Beyrouth est similaire à ce qui a été remarqué sur le site de Nice-Cimiez où ont été identifiées des petites empreintes de formes très proches. À Beyrouth, les moules, dont les fragments portent des empreintes d'anneau circulaire, ovale ou en forme de fer à cheval, évoquent une production de tenons ou anses, et de divers éléments pour les grands récipients. Nous n'avons pas trouvé d'équivalents archéologiques aux bases de moules rectangulaires. Ils ont été construits, comme les moules circulaires, entièrement dans les fosses. La forme des bases et la hauteur des fragments des parois de ces moules suggèrent la production d'objets minces, rectangulaires, de grandes dimensions et avec une large ouverture rectangulaire au centre : peut-être s'agit-il d'encadrements de portes? Les cavités associées à la base de moule circulaire B1 et à la base rectangulaire A2 sont très probablement des foyers ayant fonctionné pour sécher, décirer et cuire les moules. Ces dispositifs se retrouvent sur certains des sites déjà évoqués.

En ce qui concerne les alliages, l'utilisation du bronze au plomb pour la fabrication de grandes pièces coulées est une pratique courante durant la période romaine et elle est attestée par de nombreuses études (Adamski *et al.*, 2011 ; Craddock, 1975 ; Bayley, 1998 ; Janietz, 2000 ; Mille, 2012 ; Northover, 1998-1999 ; Riederer, 2002 a, b ; Zanda, 2002). Cet alliage pourrait être le *tenerrima* (Welter, 2003 ; Marabelli, 2007) utilisé pour la fabrication de grands bronzes et mentionné par Pline dans son *Histoire Naturelle*, Livre XXXIV (Rackham, 1961, p. 95-98, 156). Notons aussi que l'utilisation du bronze au plomb pour la fabrication de grands récipients est également établie sur le site adjacent de JEM003 et à Fréjus en France (Thomas *et al.*, 2012). Il faut toutefois remarquer que les teneurs en étain mesurées sur les déchets de ces trois sites sont différentes (figure 8d). Les analyses effectuées sur les restes en alliages cuivreux de la parcelle SFI654 indiquent généralement qu'ils sont plus riches en étain que ceux de JEM003 et dans certains cas plus pauvres que ceux de Fréjus. Ces différences peuvent être partiellement attribuées au fait que les échantillons sont issus de restes d'élaboration de l'alliage final et non d'objets finis ainsi qu'à l'influence du recyclage dans la composition de ces déchets métalliques. Cependant, les données d'analyses élémentaires récoltées sur ces trois sites montrent trois tendances distinctes qui reflètent, du moins pour JEM003 et SFI654, l'utilisation de recettes d'alliages différentes.

Pour ce qui est des terres, les métallurgistes ont besoin de céramiques pouvant supporter de hautes températures tout en conservant des propriétés mécaniques adéquates à leur utilisation. Pour le four, et en particulier pour les creusets-bassins qui doivent contenir une masse importante de métal liquide portée à au moins 1 000 °C, la terre doit être aussi inerte que possible pour éviter la vitrification, et résistante au fluage surtout dans les parties hautes où les températures sont encore plus élevées. Pour les moules de fonderie, les propriétés recherchées sont très différentes : une bonne stabilité dimensionnelle est désirée lors des différentes phases de séchage, décirage et cuisson. De plus, les moules doivent résister au choc thermique important lors de la coulée tout en ne cédant pas sous la pression provoquée par le métal liquide et les gaz. La porosité de ces terres favorise d'ailleurs le dégazage, même s'il faut remarquer ici l'absence de dégraissant organique qui aurait augmenté la porosité. À Beyrouth, les terres utilisées pour la réalisation des bassins et des moules sont de natures bien distinctes. En effet, les bassins ont été réalisés à partir d'une marne, matériau qui n'est pas le plus propice pour résister à la chaleur du métal en fusion mais qui en revanche est disponible localement en grande quantité. C'est sans doute ce dernier élément qui a été déterminant dans le choix des matières premières uti-

lisées. Sur certains bassins, il faut signaler la présence d'une couche de quartz sur la paroi interne, possiblement pour améliorer les qualités réfractaires de la surface et suppléer à la médiocrité de la matière première. Cependant, cette présence sporadique pourrait tout autant favoriser l'interprétation en faveur d'une réparation pour les zones fissurées lors du séchage.

En revanche, pour la réalisation des moules, les artisans ont mélangé un sable et la même marne argileuse utilisée pour la fabrication des bassins. Du point de vue d'un céramiste, on aurait tendance à décrire la composition comme celle d'une poterie réalisée à partir d'une argile à laquelle on aurait ajouté un sable (donc un dégraissant). Du point de vue du métallurgiste, la matière première principale est plutôt le sable qui a visiblement été préparé avec soin puisque des grains calibrés ont été sélectionnés par tamisage, l'argile servant uniquement d'agglomérant. On peut donc, dans ce cas, demeurer hésitant sur la dénomination de « dégraissant » pour un ingrédient de la recette qui est majoritaire.

L'activité métallurgique peut être partiellement restituée. L'étude des vestiges montre que l'occupation du site a été de courte durée. D'une part, cette hypothèse s'appuie sur la stratigraphie qui prouve que l'activité des bronziers est strictement contemporaine de la phase de construction du complexe monumental. D'autre part, le nombre réduit de bases de moules et la fabrication de creusets-bassins à partir de pâte calcique peu adaptée à une utilisation répétée confirmeraient le caractère limité de la production. Étant donné la forme des moules et leurs dimensions, il est très probable que cette production par fonderie était destinée au complexe monumental lui-même, l'hypothèse de besoins en de grands récipients pour les bains et d'encadrements de portes pour le sanctuaire étant la plus satisfaisante dans l'état des découvertes archéologiques.

7. CONCLUSION

L'étude des vestiges archéologiques, en particulier des déchets métallurgiques, fournit des données rares sur la grande fonderie de l'Antiquité. Divers aspects du savoir-faire des bronziers de Berytus ont ainsi pu être explorés, notamment les recettes d'alliages et des terres nécessaires à la fusion du métal et à la fabrication des moules. Il est également possible de restituer partiellement la forme et le fonctionnement des fours de fusion, ou fours à bassin, construits autour de creusets inamovibles en forme de petite cuvette abritant le foyer fortement ventilé. Pour le transport du métal liquide depuis ces fours jusqu'au moule, les données sont malheureusement trop lacunaires pour être affirmatif, mais l'hypo-

thèse la plus probable demeure celle d'une évacuation par gravité au moyen d'un canal.

La comparaison des moyens de production de grands bronzes au Liban, en Jordanie et en France montre, dans les grandes lignes, de nombreuses analogies qui se manifestent surtout par la forme des bases de moules, mais aussi par l'association avec la production de petits objets. De même, la préférence pour l'utilisation de bronze au plomb pour la coulée de grands bronzes est avérée. Cependant un examen approfondi des données archéologiques révèle tout de même quelques particularités régionales et locales comme pour les systèmes de séchage des moules. Peut-être aussi est-il possible de trouver quelques différences sensibles dans les compositions des bronzes au plomb. Ces quelques spécificités sont peut-être liées à des choix adoptés par des artisans ancrés dans leurs traditions techniques mais qui se sont adaptés aussi aux disponibilités en matière première. Sur le site, cette adaptation se manifeste clairement par l'utilisation de ressources locales a priori peu adaptées pour la fabrication de certains éléments comme les creusets-bassins, les fours et même les moules. Malgré ce handicap, il est à noter que les opérations semblent avoir été conduites avec succès. L'occupation du site relativement brève par ces artisans et la nature de la production répondant vraisemblablement à une commande s'insérant dans le programme de construction du complexe architectural, incitent à poser la question de l'itinérance de ces fondeurs dans le monde romain et la diffusion de leurs savoir-faire.

D'autres études, sur d'autres sites, où de grands bronzes ont été fondus pourraient apporter des éclairages sur ces questions, à commencer par l'analyse archéologique et archéométrique des vestiges trouvés sur la parcelle voisine, JEM002, qui apportera de nouveaux éléments de comparaison.

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre d'un post-doctorat au laboratoire IRAMAT-CRPAA et a bénéficié d'un financement du programme LabEX Sciences Archéologiques de Bordeaux, ANR-10-LABX-52. Nous remercions la Direction Générale des Antiquités du ministère de la Culture libanais pour son soutien durant de projet ainsi que M. Assaad Seif, directeur scientifique des sites SFI654, JEM002 et JEM003. Les illustrations en 3D ont été réalisées par M. Elie Hayek.

Bibliographie

- ADAMSKI F., PERNOT M., SIREIX C., 2011. Un atelier de production de grands bronzes au I^{er} siècle à Burdigala. In S. Fontaine, S. Satre et A. Tekki (dir.). *La ville au quotidien, regards croisés sur l'habitat et l'artisanat antiques, Afrique du Nord, Gaule et Italie*, p. 191-202.
- AMENDOLA R., 2010. *Influence of alloying elements on properties of casting copper base alloys*. Unpublished Ph.D. thesis, Università degli studi di Genova, Genoa.
- BAYLEY J., 1998. The production of brass in Antiquity with particular reference to Roman Britain. In P. T. Craddock (dir.). *2000 years of zinc and brass*, Occasional paper, 50, Londres, British Museum, p. 7-26.
- BAYLEY J., REHREN T. 2007. Towards a functional and typological classification of crucibles. In S. La Niece, D. Hook et P. Craddock (dir.). *Metals and Mines Studies in Archaeometallurgy*. London, Archetype Books, p. 46-55.
- CRADDOCK P. T., 1975. *The composition of copper-alloys used in the Classical World*, Thèse, Institute of Archaeology, University of London, 1975.
- EL MORR Z., 2017. Les ateliers de bronziers romains de Berytus (2^e-3^e s. apr. J.-C.) : résultats préliminaires de l'étude du site JEM003. *Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaise*, 17, p. 323-342.
- FREESTONE I. C., 1989. Refractory materials and their procurement. In A. Hauptmann, E. Pernicka, G. A. Wagner (dir.). *Old world archaeometallurgy – proceedings of the International Symposium: Old world archaeometallurgy, Heidelberg 1987*, Bochum, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums, 155-162 (Der Anschnitt; 7).
- FURGER A. 1998. Die Bronzwerkstätten in der Augst Insula 30. *Jahresberichte aus Augst und Kaiseraugst*, 19, p. 121-140.
- GRANDIEUX A., 2005. Un four de bronzier antique en milieu thermal sur le site de Cimiez à Nice (06). *Mémoires de l'Institut de Préhistoire et d'Archéologie Alpes Méditerranée*, 47, 2005, p. 103-113.
- GUYARD L., 2003. L'installation des thermes de l'est. In L. Guyard (dir.). *Le Collège de France (Paris), du quartier gallo-romain au Quartier latin*, Édition la Maison des Sciences de l'Homme, Paris, p. 58-74.
- JANIETZ B., 2000. Ein Depot zerschlagener Grossbronzen aus Augusta Raurica, Die Rekonstruktion der Gewandfiguren. *Forschungen in Augst*, Band 30, Römermuseum.
- KHALIL L., SEIGNE J., WEBER T. 2013. Metal Casting in Roman Gerasa. Preliminary report on the Jordanian-European Cultural Heritage Conservation Program at Jerash in 2012 funded by the Hashemite Kingdom of Jordan, The Republic of France and The Federal Republic of Germany, Aman.

- KÖNIG D., SERNEELS V., 2013. Roman double-layered crucibles from Autun/France: a petrological and geochemical approach. *Journal of Archaeological Science*, 40, p. 156-165.
- MARABELLI M., 2007. The monument of Marcus Aurelius: research and conservation. In Scott D., A., Podany J., Considine B. (dir.). *Ancient and Historic Metal, Conservation and Scientific Research*, the J. Paul Getty Trust, édition digitale, première édition en 1994, p. 1-19.
- MATTHEWS N., WOOD A.J. 1991. Spots before the eyes: new comparison charts for visual percentage estimation in archaeological material. *Recent Developments in Ceramic Petrology*, British Museum, Occasional Paper, 81, p. 211-263.
- MATTUSCH C., 1977. Bronze and ironworking in Athenian Agora. *Hesperia*, 46, p. 340-379.
- MATTUSCH C., 1982. *Bronzeworkers in the Athenian agora*. American School of Classical Studies at Athens.
- MILLE B., 2012. The casting techniques of Antique South Argabian large bronze statues. In P. Jett, B McCarthy and J. Douglas (dir.). *Scientific Research on Ancient Asian Metallurgy, Proceedings of the fifth Forbes Symposium at the Freer Gallery of Art*, London, Archetype Publications, p. 225-247.
- MOREL J., CHEVALLEY C., CASTELLA D., 2001. La fabrication de grands bronzes à Aventicum. Une fosse de coulée dans l'insula 12. *Bulletin de l'association Pro Aventico*, 43, p. 141-162.
- NERI E., 2006. *De campanis fundendis. La produzione di campane nel medioevo tra fonti scritte ed evidenze archeologiche*, Milano.
- NORTHOVER P., 1998-1999. Copper Alloy Metalwork from 5th-6th century Levels in Beirut. *Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises*, 3, p. 139-146.
- PERNOT M., 2011. Quels métiers les arts plombiers, bronziers et orfèvres impliquent-ils?, In N. Monteix et N. Tran (dir.). *Les savoirs professionnels des gens de métiers*, Collection du Centre Jean Bérard, 37, Naples, p. 101-118.
- RACKHAM H., 1961. *Pliny, Natural History*, Libri XXXIII-XXXV, Volume IX, by H., William Heinemann Ltd., London.
- RIEDERER J., 2002a. The use of standardised copper alloys in Roman metal technology. In *I Bronzi Antichi: Produzione e Tecnologia*, Montagnac, Éditions Monique-Mergoïl, p. 284-289.
- RIEDERER J., 2002b. Die Metallanalyse der römischen Statuetten des Römisch – Germanischen Museums in Köln. In *I Bronzi Antichi: Produzione e Tecnologia*, Montagnac, Éditions Monique-Mergoïl, p. 292-300.
- TERRY R. D., CHILINGER G.V., 1955. Summary of "Concerning some additional aids in studying sedimentary formations", by M. S. Shvetsov. *Journal of Sedimentary Petrology*, 25, p. 229-234.
- THOMAS N., DUMONT A., MILLE B., AZÉMA A., 2012. Un atelier de bronzier antique. In A. Dumont (dir.). *251, avenue des Aqueducs à Fréjus (Var) : un atelier de bronzier antique à la Porte de Rome*, Rapport final d'opération de fouilles archéologiques, Institut national de recherches archéologiques préventives, Nîmes, p. 71-106.
- THOMAS N., MILLE B., LOISEAU C., 2015. Fondre une statue à Vindinum au II^e siècle. In S. Raux, V. Brouquier-Reddé, M. Monteil et W. Van Andringa (dir.). *Des Dieux et des hommes : Cultes et sanctuaires en Sarthe et en Mayenne dans l'Antiquité*. Le Mans, Ville du Mans, p. 182-189.
- WELTER J.M., 2003. Pliny the Elder and Bronze. In *International Conference on Archaeometallurgy in Europe 24, 25 September 2003, Milan, Italy, Proceedings*, Vol. 2, Milan, Associazione Italiana di Metallurgia, p. 211-221.
- ZANDA E., 2002. I bronzi da industria (Monteu da Po-Torino), in *I Bronzi Antichi: Produzione e Tecnologia*. Montagnac, Éditions Monique-Mergoïl, p. 251-257.
- ZIMMER G., 1990. *Griechische Bronzegusswerkstätten: zur Technologieentwicklung eines antiken Kunsthandwerkes*. Mainz am Rhein, P. von Zabern.