



HAL
open science

La métallurgie du Levant au Bronze Moyen à travers les armes

Ziad El Morr

► **To cite this version:**

Ziad El Morr. La métallurgie du Levant au Bronze Moyen à travers les armes. Archéologie et Préhistoire. Université Michel de Montaigne - Bordeaux III, 2011. Français. NNT : . tel-00770476

HAL Id: tel-00770476

<https://theses.hal.science/tel-00770476>

Submitted on 6 Jan 2013

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

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

Université Michel de Montaigne Bordeaux 3

École Doctorale Montaigne Humanités (ED 480)

THÈSE DE DOCTORAT EN « SCIENCES ARCHEOLOGIQUES »

**LA METALLURGIE DU LEVANT AU BRONZE
MOYEN A TRAVERS LES ARMES**

Présentée et soutenue publiquement le 15 novembre 2011 par

Ziad EL MORR

Sous la direction de Michel Pernet, Directeur de recherche au CNRS

Membres du jury

M. David BOURGARIT, Responsable des études en métallurgie, C2RMF Rapporteur

M. Frank BRAEMER, Directeur de recherche au CNRS.

M. Guillaume GERNEZ, Maître de conférences à l'Université de Paris I

M. Michel PERNOT, Directeur de recherche au CNRS

M. Paolo PICCARDO, Professeur de l'Université de Gênes Rapporteur

M. Assaad SEIF, coordinateur des recherches archéologiques, DGA (Liban)

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un financement CNRS BDI-PED.

Tout d'abord, je tiens à remercier à M. Pierre Guibert, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse au sein du laboratoire IRAMAT-CRPAA. Je remercie également M. Assaad Seif et le personnel de la Direction Générale des Antiquités Libanaises pour m'avoir permis et facilité l'accès au matériel archéologique du Musée National de Beyrouth ainsi que pour leur encouragement et leur enthousiasme dans ce projet.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à M. Michel Pernot pour avoir accepté de diriger ce travail et pour son investissement et son soutien durant ces trois années. Je le remercie également pour sa disponibilité et ses conseils tant au niveau humain que scientifique.

Je voudrais remercier M. David Bourgarit et M. Paolo Piccardo pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Merci de m'avoir fait part, autant de fois que cela a été possible, de vos connaissances sur la métallurgie et de m'avoir confié des échantillons expérimentaux en alliages cuivreux. Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à M. David Bourgarit pour les analyses PIXE et pour m'avoir facilité l'accès à la base de données du Louvre.

Je tiens à remercier M. Guillaume Gernez, membre du jury, pour m'avoir initié à la typologie des armes et pour son intérêt vis-à-vis de mes recherches.

Je souhaite remercier M. Frank Braemer pour nous avoir fait l'honneur de faire partie du jury de cette thèse.

Je voudrais exprimer mes sincères remerciements à M. Nicolas Thomas pour m'avoir accueilli à Barsy et pour m'avoir appris et aidé dans la réalisation (même sous la pluie) des recreations expérimentales. Merci à M. Jean Dubos pour tous ses conseils sur la coulée et les moules ainsi qu'à M. Bastien Asmus qui m'a fait découvrir l'art du feu et m'a transmis à cette occasion son obsession pour le four. Merci aussi à toute l'équipe d'archéologie expérimentale de Barsy avec qui j'ai partagé une semaine très agréable; j'ai découvert que le bonheur peut se trouver dans la glaise, les briques, le crottin de cheval, les sacs de charbon, le feu et le métal.

Je tiens à remercier Mme Florence Cattin pour la réalisation des analyses des isotopes du plomb, pour ses relectures mais aussi pour son agréable accueil à Louvain.

Je voudrais remercier Mme Agnès Benoit qui m'a permis d'accéder à la base de données du Louvre.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance aux permanents du CRPAA, Christelle, Stéphane, François-Xavier, Yannick, Claude, Ayed, Nadia, Floréal, Norbert, Françoise et Pierre pour leur apport dans ce travail et plus que ça. Merci aussi aux doctorants du CRPAA, Laure, les deux Laetitia, les deux Aurélie, Marion P., Céline, Fred avec qui j'ai passé trois agréables années. A Sophie pour ses relectures, sa disponibilité et pour son amitié. Aux deux colocataires du bureau 8 ; Armel pour tous les Yoko-giri qu'il m'a donné et Guillaume pour tous les Maï-giri (avec effet son) qu'il m'a permis de lui donner.

Merci à Marion pour m'avoir soutenu et supporté en permanence tout au long de ces trois années me permettant ainsi de réaliser ce travail en toute sérénité.

Enfin, je tiens à remercier mes parents qui ont toujours su m'encourager malgré la distance.

Table des matières

Remerciements.....	3
Table des matières.....	7
Introduction.....	13
I - Les données archéologiques.....	17
Chapitre I : Géographie, chronologie et histoire du Levant.....	19
1.1.1-Cadre géographique.....	19
1.1.2-Chronologie.....	22
1.1.3-Cadre historique.....	22
Chapitre II : Les sites étudiés et leurs contextes archéologiques.....	29
1.2-Introduction.....	29
1.2.1-Byblos.....	31
1.2.1.1- Les dépôts d'offrandes.....	34
1.2.1.2- Les tombes.....	36
1.2.1.3- Les contextes mal définis.....	37
1.2.2-Tell Arqa.....	38
1.2.3- Yanouh (Tell Kharayeb).....	39
1.2.4- Khariji.....	41

Chapitre III: Typologie des armes.....	43
1.3.1 Les haches fenestrées.....	43
1.3.1.1 <i>Les haches fenestrées larges.....</i>	<i>44</i>
1.3.1.2 <i>Les haches fenestrées étroites.....</i>	<i>47</i>
1.3.2 Les pointes de lances à douille.....	49
1.3.2.1 <i>Les pointes de lances à douille longues.....</i>	<i>50</i>
1.3.2.2 <i>Les pointes de lances à douille moyennes.....</i>	<i>53</i>
1.3.2.3 <i>Les pointes de lances à douille courtes.....</i>	<i>54</i>
1.3.3 Les pointes de lance à languette rivetée.....	57
1.3.4 Les poignards.....	59
1.3.4.1 <i>Le poignard simple à languette.....</i>	<i>59</i>
1.3.4.2 <i>Les poignards simple et à talon.....</i>	<i>61</i>
1.3.4.3 <i>Les poignards à sillon ou double sillon médian.....</i>	<i>62</i>
1.3.4.4 <i>Poignard à double nervure.....</i>	<i>63</i>
1.3.4.5 <i>Les poignards à lame bombée et à filets ou sillons/rainures multiples.....</i>	<i>64</i>
Chapitre IV : Ateliers et artisans.....	67
1.4.1 Organisation du travail des artisans des alliages cuivreux au Proche Orient.....	67
1.4.2 les vestiges de la métallurgie de transformation de Tell Arqa et de Byblos.....	71
1.4.2.1 <i>Tell Arqa.....</i>	<i>71</i>
1.4.2.2 <i>Byblos.....</i>	<i>74</i>
1.4.2.3 <i>La question de « l'atelier de bijouterie ».....</i>	<i>76</i>

II - Etude de la métallurgie des alliages cuivreux.....	79
Chapitre I : Etat de la recherche.....	81
2.1.1 Synthèse des travaux sur la métallurgie ancienne du Levant du Chalcolithique jusqu'au Bronze Moyen.....	81
2.1.1.1 <i>Les 5^e et 4^e millénaires et la première moitié du 3^e millénaire (Chalcolithique, Bronze ancien I, II et III).....</i>	<i>82</i>
2.1.1.2 <i>2400-1600 B.C. (Bronze Ancien IV, Bronze Moyen I et II).....</i>	<i>84</i>
2.1.2 Propriétés des alliages cuivreux.....	85
Chapitre II : Etude de la morphologie des armes.....	95
2.2 Introduction.....	95
2.2.1 Mesures métriques.....	96
2.2.1.1 <i>Les haches fenestrées.....</i>	<i>96</i>
2.2.1.2 <i>Les pointes de lances à douille.....</i>	<i>98</i>
2.2.1.3 <i>Les poignards et les pointes de lance à languette rivetée.....</i>	<i>100</i>
2.2.2 Examen macroscopique.....	101
2.2.2.1 <i>Les stigmates de fabrication.....</i>	<i>101</i>
2.2.2.2 <i>Les traces d'usage.....</i>	<i>102</i>
2.2.2.3 <i>Les traces de post-déposition et l'état actuel des armes.....</i>	<i>103</i>
Chapitre III : Métallographie.....	105
2.3 Introduction.....	105
2.3.1 Prélèvement des échantillons.....	106
2.3.2 Préparation des échantillons.....	107
2.3.2.1 <i>L'enrobage.....</i>	<i>107</i>
2.3.2.2 <i>Le pré-polissage et le polissage.....</i>	<i>107</i>
2.3.3 Microscope optique en réflexion.....	108

2.3.4	Principe du microscope électronique à balayage (MEB).....	108
2.3.5	Principe de la spectroscopie par dispersion d'énergie de rayons X (EDXS).....	109
2.3.6	Conditions d'opération et de mesures des échantillons par MEB-EDXS.....	109
	Chapitre IV : Analyses des isotopes du plomb.....	113
2.4.1	Pincipe.....	113
2.4.2	Préparation et mesure des échantillons.....	114
	III - Résultats et discussions.....	117
	Chapitre I : Microstructure des armes.....	119
3.1.1	Résultats.....	119
	<i>3.1.1.1 Les haches fenestrées.....</i>	<i>119</i>
	<i>3.1.1.2 Les poignards.....</i>	<i>122</i>
	<i>3.1.1.3 Les pointes de lances à languette rivetée.....</i>	<i>125</i>
	<i>3.1.1.4 Les pointes de lances à douille.....</i>	<i>127</i>
3.1.2	Discussion.....	131
	<i>3.1.2.1 Les haches fenestrées.....</i>	<i>131</i>
	<i>3.1.2.2 Les poignards.....</i>	<i>133</i>
	<i>3.1.2.3 Les pointes de lances à languette rivetée.....</i>	<i>135</i>
	<i>3.1.2.4 Les pointes de lances à douille.....</i>	<i>137</i>
3.1.3	Etude des inclusions permanentes.....	142
	<i>3.1.3.1 Evaluation de la déformation.....</i>	<i>143</i>
	<i>3.1.3.2 Quantification des inclusions.....</i>	<i>146</i>
	Chapitre II : Composition des armes.....	151
3.2.1	Résultats.....	151

3.2.1.1	<i>Les haches fenestrées.....</i>	<i>151</i>
3.2.1.2	<i>Les poignards.....</i>	<i>153</i>
3.2.1.3	<i>Les pointes de lances à languette rivetée.....</i>	<i>154</i>
3.2.1.4	<i>Les pointes de lances à douille.....</i>	<i>155</i>
3.2.2	Discussion.....	158
Chapitre III : Simulations expérimentales.....		167
3.3	Introduction.....	167
3.3.1	Fabrication des modèles en cire dans des moules en terre crue.....	170
3.3.2-	Fabrication des moules en terre cuite par la technique de la cire perdue.....	173
3.3.3	Fabrication des moules en pierre tendre.....	174
3.3.4	La coulée.....	176
3.3.5	Discussion.....	181
3.3.5.1	<i>Moule en terre cuite vs moule en pierre tendre.....</i>	<i>181</i>
3.3.5.2	<i>Propriétés des alliages et les défauts.....</i>	<i>183</i>
Chapitre IV : Analyses des isotopes du plomb.....		185
3.4.1	Représentation des résultats.....	185
3.4.2	Les échantillons.....	185
3.4.3	Présentation et interprétation des résultats.....	186
3.4.4	Détermination des sources du cuivre.....	190
IV – Bilan.....		199
Chapitre I : Savoir-faire des artisans.....		201
4.1.1	Les moules.....	201
4.1.2	Le travail de déformation et les recuits.....	204

4.1.3 La brasure.....	209
4.1.4 Le choix des recettes d'alliages.....	211
Chapitre II : Apport de l'étude de la technologie à l'archéologie.....	215
4.2.1 Apport de l'étude de la technologie à la typologie.....	215
4.2.2 Armes de combat ou objets de prestiges ?.....	219
4.2.3- Nouveautés, diffusions et connections interrégionales.....	222
Conclusion.....	227
Bibliographie.....	231
Annexe 1 : Tableaux.....	253
Annexe 2 : Analyses complémentaires.....	271
Annexe 3 : Illustrations complémentaires.....	277
Annexe 4 : Publications scientifiques	287

Volume 2 : Catalogue (cédérom)

Introduction

L'essor de la métallurgie des alliages cuivreux a grandement contribué à l'évolution technologique des sociétés antiques. Pour autant, cette pratique reste pour l'heure mal connue notamment dans la région du Levant au Proche Orient. C'est donc dans l'objectif de pallier ce manque que s'inscrit ce travail. L'étude de la métallurgie de transformation des alliages cuivreux présente un double intérêt : elle participe d'une part à la connaissance de l'histoire des techniques, mais peut également apporter des informations d'ordre social, culturel et économique. En effet, les propriétés des alliages cuivreux ont favorisé leur utilisation dans une large gamme de produits, comme les éléments architecturaux et décoratifs, la vaisselle, les objets de parures, les objets de culte, les outils et les armes. Chacun de ces objets présente des propriétés, telles que la dureté en opposition à la déformabilité, adaptées à leur fonction. Celles-ci sont tributaires du processus de mise forme et de la recette d'alliage. Dans l'absolu, la fabrication d'un objet en alliage cuivreux dépend donc du savoir-faire de l'artisan, mais également des exigences du commanditaire au sens large du terme, du coût et de la disponibilité de la matière première.

Notre étude vise à traiter de ces différents aspects à travers la métallurgie des armes dans la région levantine au cours Bronze Moyen I et des prémices du Bronze Moyen II. Par opposition au Bronze Ancien, cette période chronologique est marquée par l'utilisation régulière du bronze (alliage composé de cuivre et d'étain), par l'apparition des alliages au plomb ainsi que par l'adoption de nouveaux types d'armes présentant des formes et des techniques d'emmanchement, comme la douille et le collet, jusqu'à lors très peu ou non utilisées au Levant.

Le corpus étudié est constitué d'armes provenant du site de Byblos, pour l'essentiel, mais également des sites d'Arqa, de Khariji et de Yanouh. En raison de la méthode de fouilles employée, l'étude du site de Byblos présente plusieurs problèmes liés aux contextes archéologiques, à la stratigraphie et à la chronologie. Dans ce cas, une attention toute particulière a été portée au choix du matériel étudié dans ce travail afin de s'affranchir le plus possible de ces problèmes. Les armes représentent, face à ces contraintes, une opportunité tant au niveau de leurs contextes archéologiques favorables (dépôts et tombes) que de leur typologie établie. Pour un même type d'arme, plusieurs exemplaires ont fait l'objet de prélèvements, afin de s'assurer au mieux de la représentativité des

résultats. En effet, cette approche permet d'évaluer si les traits techniques caractéristiques d'une arme représentent un cas isolé ou s'ils s'inscrivent dans un comportement de production récurant conduisant à la définition du savoir-faire des artisans.

La méthodologie adoptée dans ce travail consiste en une approche interdisciplinaire entre science des matériaux, archéologie expérimentale et archéologie. Elle a été établie dans le but d'atteindre quatre objectifs principaux permettant l'évaluation de la métallurgie de transformation.

- 1- Mettre au jour, par des observations métallographiques, les techniques de mise en forme employées par l'artisan. Celles-ci peuvent être divisées en quatre grandes catégories qui sont les techniques de fonderie (fonctionnalité et type du moule...), les techniques de déformation (martelage, torsion, pliage...), les techniques d'assemblage (rivetage, soudure, brasure...) et les techniques de finition (polissage, décoration...).
- 2- Déterminer les recettes d'alliage à partir desquelles les armes ont été fabriquées en effectuant des analyses élémentaires.
- 3- Reconstituer le processus complet de fabrication de chaque type d'arme. L'association des différentes données obtenues par l'étude des techniques de mise en forme et des recettes permet de reconstituer et d'évaluer la *chaîne opératoire* utilisée dans la fabrication des armes. Certaines étapes proposées pour la fabrication de quelques armes seront vérifiées par l'intermédiaire de l'archéologie expérimentale. En effet, cette approche permet de s'affranchir du système de fonctionnement d'un atelier.
- 4- Comprendre les choix des artisans : généralement, les techniques de mise en forme et les recettes d'alliages employées reflètent un ensemble de choix pris par l'artisan dans le but d'obtenir un objet métallique « réussi » présentant une forme et des propriétés précises. La fabrication de cet objet répond à des exigences de facilité de production, de fonctionnalité de l'objet, de coût et de disponibilité de métaux, ainsi qu'à des normes esthétiques et traditionnelles. Ces facteurs peuvent être plus ou moins déterminants dans le choix du procédé de la mise en forme et de la recette suivant le type d'objet, son usage et la demande du commanditaire. Ainsi, ces choix ne peuvent se comprendre qu'en associant les données technologiques à celles concernant la forme et la fonction (symbolique et/ou pratique) de l'arme. Il s'agit donc de confronter les résultats archéométriques aux données archéologiques comme la typologie, les contextes de découverte et les sources textuelles.

Loin d'être l'objectif principal de ce travail, nous avons fait le choix d'ouvrir le sujet sur la recherche de provenance du cuivre à travers la méthode des isotopes du plomb. En raison de la complexité de la mise en œuvre de cette méthode, et de la difficulté d'interprétation de ses résultats, nous avons appréhendé cette étude sous l'angle exploratoire, dans le but d'en tester le potentiel, dans l'aire géographique concernée, et d'apporter quelques premières informations.

Ce manuscrit est divisé en quatre parties. La première partie est destinée à fixer le cadre archéologique général de cette étude. Ainsi, les contextes géographique et historique de la région concernée seront succinctement décrits. Nous décrirons ensuite les contextes archéologiques dans lesquels les armes ont été trouvées. Les principales typologies établies pour ces armes (Gernez, 2007, Philip, 1989) seront présentées et comparées. Egalement, nous aborderons brièvement les différents types d'organisation des ateliers au sein des sociétés proche-orientales du Bronze Ancien et Moyen ainsi que les vestiges métallurgiques du site de Byblos et d'Arqa. La seconde partie de ce manuscrit concerne principalement l'approche par les méthodes et les techniques de *l'archéométallurgie*. Dans un premier temps nous proposerons une synthèse, actualisée, des analyses archéométriques effectuées sur des vestiges et du mobilier métallique, provenant de la région du Levant et attribués aux périodes du Chalcolithique, du Bronze Ancien et Moyen. Egalement, nous ferons un bilan des principaux résultats obtenus à partir de travaux récents effectués dans le but d'étudier les propriétés de quelques classes d'alliages comme le bronze, le cuivre à l'arsenic et le bronze au plomb. Cette seconde partie intègre un chapitre concernant la méthodologie adoptée dans ce travail. Les résultats obtenus par les méthodes analytiques seront exposés dans une troisième partie. Ils seront confrontés avec des données analytiques obtenues sur d'autres armes du Levant. Des modèles de mise en forme de plusieurs types d'arme seront proposés et discutés à la lumière des résultats expérimentaux et des données archéologiques. La quatrième partie présente un bilan des résultats obtenus et de leurs apports à l'étude de la métallurgie et de l'archéologie. Dans un premier temps, nous traiterons des spécificités de plusieurs méthodes de mise en forme employées au Bronze Moyen. Ensuite, nous proposerons des interprétations sur les pratiques sociales et culturelles de l'époque. Enfin, nous replacerons les conclusions apportées sur les caractéristiques de la métallurgie de transformation au Bronze Moyen I dans un contexte interrégionale.

I - Les données archéologiques

Chapitre 1 : Géographie, chronologie et histoire du Levant

Chapitre 2 : Les sites étudiés et leurs contextes archéologiques

Chapitre 3: Typologie des armes

Chapitre 4 : Ateliers et artisans

Chapitre 1

Géographie, chronologie et histoire du Levant

1.1.1-Cadre géographique

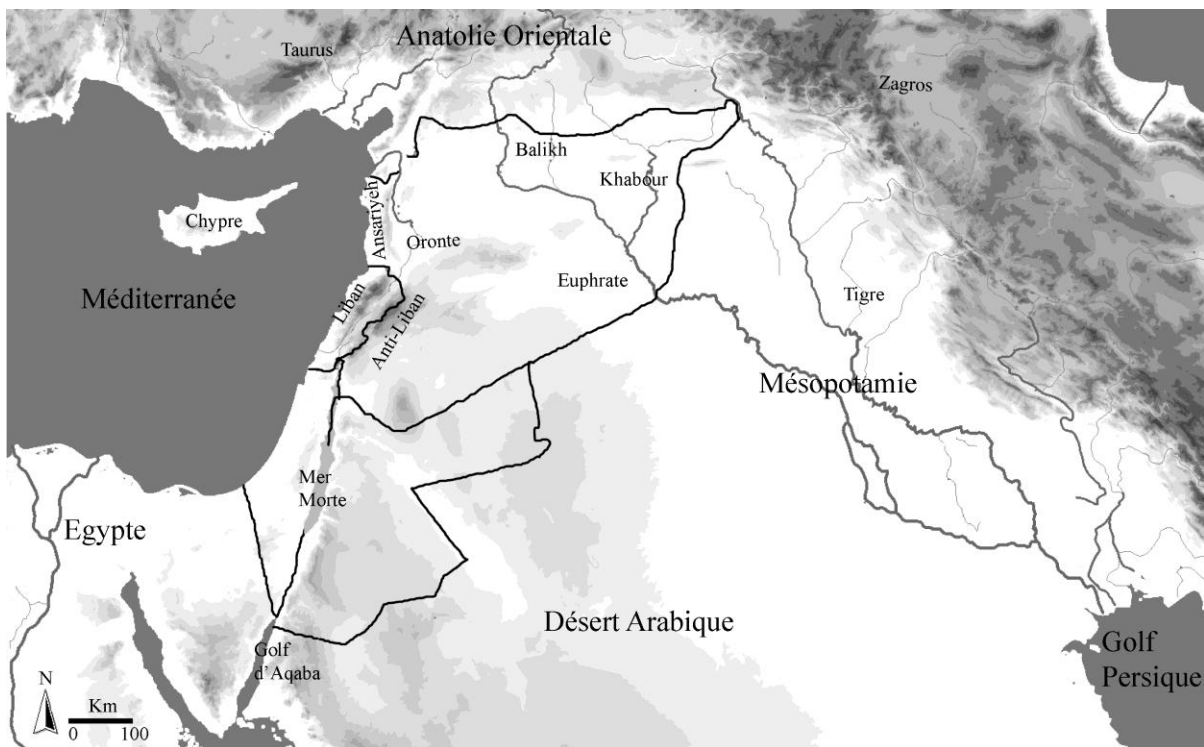


Figure 1: Carte du Proche Orient.

Le terme de « Levant » est emprunté par les archéologues pour désigner la région de la côte orientale méditerranéenne située entre la Mésopotamie, l'Anatolie Orientale, l'Égypte et le désert arabe. Ce terme englobe, selon la géographie actuelle, les états de la Syrie et du Liban, et les régions de la Palestine et de la Transjordanie (Leclant, 2005 ; 1255). La partie littorale de la région désigne une zone côtière étroite, séparée de l'intérieur des terres par une double chaîne de montagnes parallèle à la côte méditerranéenne, qui

s'étend du nord au sud (Sanlaville 2000 ; 19-21). Cette zone montagneuse est divisée longitudinalement par une dépression qui s'étend de l'Amanus jusqu'à la mer rouge. L'arrière-pays est constitué de plaines et de plateaux légèrement inclinés vers l'est interrompus par quelques zones accidentées comme les montagnes de la Palmyrène, le Djebel El-Druze et Djebel Bishri.

Le climat du littoral levantin est méditerranéen. En moyenne, la partie montagneuse du littoral reçoit entre 500 mm (côtes syro-libanaise) et 1500 mm (Mont Liban) de pluie par an. Les précipitations diminuent très fortement dès lors que l'on se dirige vers l'Est (Damas 200 mm/an) et vers le Sud (Eilat 27 mm/an) où le climat devient aride (Sanlaville 2000; 49). La région est traversée par trois fleuves principaux : l'Euphrate (2780 km) qui prend sa source en Turquie et se jette dans le golfe persique. Il traverse le Nord de la Syrie où il est essentiellement alimenté par le Balikh et le Khabour. L'Oronte (571 km) représente, en termes de longueur, le deuxième fleuve le plus important de la région. Il prend sa source au nord du Mont Liban (Aïn Zarqa) et traverse l'ouest de la Syrie et la province de Hatay en Turquie où il se jette dans la Méditerranée. Enfin, le Jourdain (360 km) naît au Mont Hermon, traverse la Palestine en passant par le lac Houlé et le lac Tibériade, pour se jeter dans la Mer Morte. « Dans le Levant-sud, peu élevé et faiblement arrosé, le Jourdain est, de loin, le principal organisme hydrologique » (Sanlaville 2000 ; 62).

L'hétérogénéité environnementale du Levant a contribué à la création d'une diversité culturelle, à l'échelle régionale, modelée par le climat, la situation géographique et l'abondance des différentes ressources naturelles. Pour citer un exemple de cette diversité, retenons que les populations de la Syrie du nord-est utilisaient surtout les briques en terre crue pour le bâti et leur économie était basée sur le pastoralisme et l'agriculture des graminées (Akkermans, Schwartz, 2003), alors que sur le littoral, la pierre était souvent utilisée pour le bâti et l'économie de certaines villes comme Byblos était plutôt basée sur le commerce maritime et l'exploitation des ressources forestières.

La zone concernée par la présente étude est située dans la moitié nord du Liban. Elle comprend le littoral et le versant ouest du Mont Liban situés entre Beyrouth, l'actuelle capitale du Liban, et la plaine du Akkar aux frontières de l'actuelle Syrie. La plaine littorale est généralement étroite (7 km en moyenne) sur une grande partie de sa longueur, mais s'élargit au niveau de la plaine du Akkar où elle peut atteindre une largeur de 30 km. Le Mont Liban est composé d'un noyau jurassique couvert par une épaisse carapace de calcaires cénomaniens. Son versant ouest décrit, de la base au sommet, une élévation raide puis des plateaux de moyennes altitudes découpés par une série de vallées étroites et parallèles. Le relief se transforme ensuite en élévations raides et en escarpements qui atteignent les sommets.

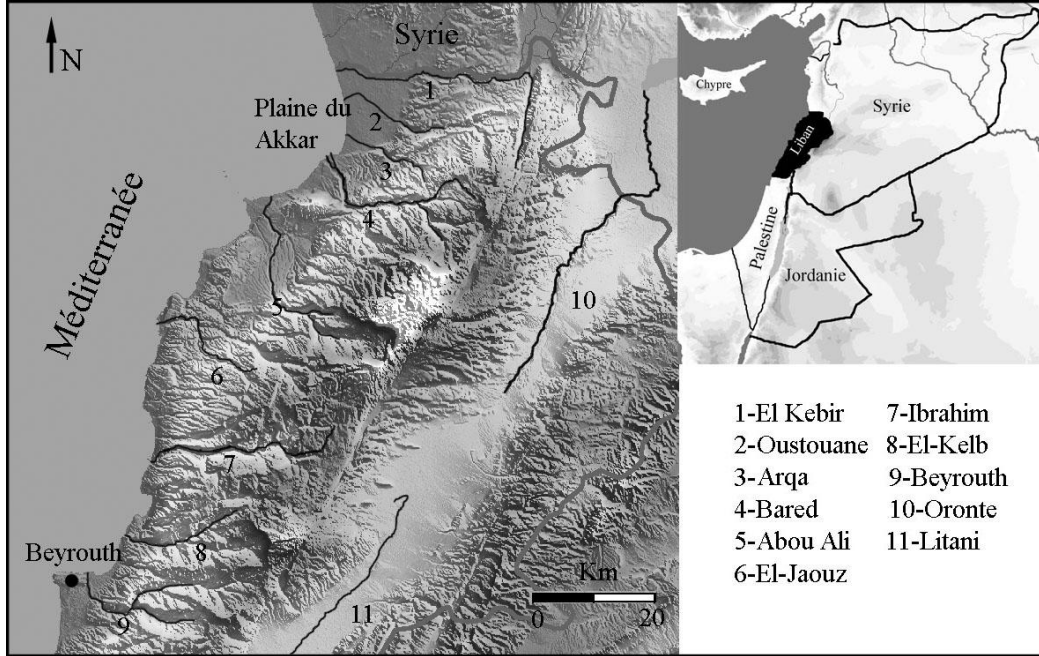


Figure 2: carte de la région étudiée.

Cette zone du Liban est traversée par neuf rivières pérennes de direction est-ouest prenant leurs sources dans le versant ouest du Mont Liban pour se déverser dans la Méditerranée. En comparaison avec le reste du Proche Orient, cette région a une moyenne pluviométrique élevée : la moyenne annuelle actuelle de précipitations sur le littoral est comprise entre 700 et 1000 mm. Elle monte jusqu'à 1500 mm par an sur le versant ouest du Mont Liban parce que celui-ci forme une barrière naturelle contre le mouvement des nuages vers l'arrière-pays. Cette richesse en eau a favorisé l'abondance et la diversité de la faune et la flore. Ainsi, le littoral est caractérisé par une végétation sempervirente comprenant le myrte commun et le pistachier lentisque. Entre 300 m et 1200 m, les zones d'altitudes moyennes sont dominées par le pin, le pistachier, le chêne et autrefois, l'olivier à l'état sauvage. Le chêne subsiste jusqu'à 2600 m où il est accompagné par le cèdre du Liban et le genévrier. Au-dessus de 2600 m, règne une végétation adaptée aux grandes amplitudes thermiques et à la neige constituée de plantes à coussinet (Sanlaville 2000 ; 80-81). Les forêts et les rivières étaient l'habitat d'une variété d'espèces animales comme le sanglier, le daim de Mésopotamie, l'ours brun et l'hippopotame (Villa 2004).

1.1.2- Chronologie

La chronologie adoptée pour l'ensemble du Levant correspond à celle de Richard (1987) pour le Bronze Ancien et de Gerstenblith (1980) et Dever (1976) pour le Bronze Moyen. Occasionnellement, les périodes chronologiques de l'Égypte, du sud de la Mésopotamie et de l'Anatolie centrale seront utilisés dans les cas les plus opportuns. De ce fait, et par souci de clarté, nous incluons un tableau (annexe 1 : T.a. 1) comparant les chronologies de ces quatre régions.

1.1.3-Cadre historique

La situation géographique de la région du Levant, au carrefour des continents africain, asiatique et européen, associée à la richesse de ses ressources naturelles, a favorisé l'installation de l'homme dans cette région dès le Paléolithique ancien. Cette région constitue un des premiers foyers de sédentarisation : les premiers villages de chasseurs-cueilleurs proprement dits, comme Mallaha en Palestine et Abu Hureyra en Syrie du Nord, sont apparus entre le 12^e et le 10^e millénaire av. J.-C. (Cauvin 1978 ; 13, Akkermans, Schwartz 2003 ; 23-25). Au cours des millénaires suivants, la domestication des espèces végétales et animales et le développement de l'architecture, de l'irrigation, de l'outillage lithique, de la céramique et de la métallurgie ont entraîné des changements socioculturels. Ces modifications, qui sont à la base du processus d'urbanisation, se manifestent par l'élargissement des agglomérations, la structuration hiérarchique de la société, la spécialisation des artisans et l'intensification des échanges commerciaux (Huot *et al.* 1990). Les vestiges archéologiques semblent indiquer que la première urbanisation de la Syrie est d'origine mésopotamienne: durant la deuxième moitié du 4^e millénaire, la ville de Habuba Kabira/Tell Qannas, située dans le moyen Euphrate, présente presque exclusivement des éléments qui appartiennent à la culture sud-mésopotamienne d'Uruk. L'architecture, la céramique, et la glyptique montrent que cette culture sumérienne s'est répandue tout au long de l'Euphrate. Ainsi, en Syrie durant cette période, nous trouvons soit des sites indigènes fortement influencés par cette culture, comme Tell Brak dans les plaines du Khabour, soit des colonies Urukéennes comme Habuba Kabira/Tell Qannas et Aruda (Huot *et al.* 1990 ; 39, Akkermans, Schwartz 2003 ; 181-210). Cette première expérience d'urbanisation fut éphémère. En effet, 150 ans après sa fondation, Habuba Kabira/Tell Qannas a été abandonnée vers la fin du 4^e millénaire.

Etablie sur la côte libanaise depuis le 7^e millénaire, Byblos présente durant le 4^e millénaire (Chalcolithique final/Bronze Ancien I) des preuves d'activités commerciales. Du matériel, mis au jour dans les tombes *énéolithiques* du site de Byblos, témoigne des échanges commerciaux directs ou indirects avec les régions environnantes. Ce matériel, exceptionnellement riche, comprend de l'obsidienne probablement d'origine Anatolienne, des figurines en ivoire de style Egyptien (Prag, 1986), des parures en argent, des outils et des armes en cuivre ou alliages cuivreux qui attestent la présence de matière première et de produits finis d'origines étrangères. Les sites de Dakkerman à Sidon et de Ras Shamra sur la côte Syrienne ont livré des tombes similaires à celles de Byblos mais avec très peu de mobilier funéraire, ce qui montre le caractère exceptionnel de Byblos (Artin 2009).

En Palestine, une forte influence égyptienne est attestée à partir de la deuxième moitié du 4^e millénaire avec, probablement, la présence de colonies égyptiennes au sud ainsi que de nombreux sites présentant des artefacts d'origine égyptienne (Mazzoni, 2009). Cette influence décroît considérablement à la fin de ce millénaire et n'aurait probablement pas d'impact important sur l'apparition de l'urbanisation qui est considérée comme étant un phénomène local (Nicolle, 2007). Cet urbanisme se manifeste par l'apparition de petites villes fortifiées, au début du 3^e millénaire, comme Arad, Yarmouth et Khirbet Kerak. Les fortifications consistent en des murs en briques crues installées sur des assises en pierre pourvus de tours semi-circulaires. A l'intérieur de la ville, l'habitat est dense avec des maisons à trois ou quatre pièces sans cours centrale. Il est supposé que la sphère d'influence de chacune de ces villes s'étend sur le territoire agricole et les villages environnants (Huot *et al.* 1990).

L'urbanisation semble gagner la côte est de la Méditerranée durant le 3^e millénaire. Byblos, dotée d'un rempart au début du 3^e millénaire, est de plus en plus peuplée. L'habitat s'organise en îlots et quartiers autour de la zone de source sacrée. Le plan de la ville ne cesse d'évoluer autour de cette zone qui conserve sa fonction jusqu'à la fin de ce millénaire ; au début de cette période la zone sacrée présente des temples, de même plan que les maisons, séparée des habitations par une clôture. A partir du deuxième quart du 3^e millénaire, plusieurs bâtiments de dimensions monumentales à fonction probablement administrative, comme *la grande résidence*, et religieuse, comme le *temple en L* et le *temple de la Ba'alat* (déesse locale assimilée à la déesse égyptienne Isis-Hathor), occupent la zone sacrée. Ces bâtiments subissent des modifications architecturales tout au long du 3^e millénaire tout en gardant leurs fonctions (Lauffray 2008, Saghieh 1983). Les réseaux commerciaux s'intensifient, ils se manifestent par la présence des sceaux-cylindres mésopotamiens et du lapis-lazuli, dont la source probable est l'Afghanistan. La ville entretient des relations privilégiées avec l'Egypte à qui elle fournit du bois pour la construction des palais et pour la marine. Ces relations se manifestent surtout par la

présence d'offrandes de souverains égyptiens dans le *temple de la Ba'alat* et par l'adoption du système d'écriture hiéroglyphique (Dunand 1973). Plusieurs sites, dont les plus anciens niveaux d'occupation datent de la première moitié du 3^e millénaire, ont été découverts au Liban : Tell Fadous, site fortifié au nord de Byblos (Genz 2009), Beyrouth (Bader 1997) et Tell Arqa, situé dans la plaine du Akkar. Ce dernier site devient, à partir de la deuxième moitié du 3^e millénaire, un centre régional entouré plusieurs villages agricoles satellites (Thalman 2006 ; 215). Notons que la zone de l'actuelle ville de Sidon présente une occupation quasi-continue depuis le 4^e millénaire.

Durant la première moitié du 3^e millénaire dans les plaines du Khabour, en Syrie du Nord, l'économie semble être basée sur l'agriculture sans système d'irrigation. Plusieurs sites de cette région, comme Leilan, Mozan et Brak, présentent des dimensions de 15 à 20 ha et sont entourés par des villages satellites. À l'ouest de la Syrie, encore mal connu, une activité artisanale assez importante se manifeste par des produits finis comme des armes en alliages cuivreux à Qara Quzaq, par la présence d'un atelier de travail de la pierre comme au nord de Habuba Kabira, ou encore par des moules d'armes à Halawa (Akkermans, Schwartz 2003). La ville de Mari a été fondée dans une région aride de l'est de la Syrie. Son économie basée sur le contrôle du commerce dans la vallée de l'Euphrate lui a permis d'entreprendre de grands projets comme l'établissement d'un réseau d'irrigation pour assurer sa subsistance ainsi qu'un canal de transport fluvial d'au moins 4 km connectant la ville à l'Euphrate (Margueron 2004 ; 69-79). Le centre du Tell de Mari présente des constructions monumentales, comme le temple de la déesse Ishtar et celui de Dagan, datant du début de la deuxième moitié du 3^e millénaire, période qui correspond à l'intense urbanisation de la Syrie. Ce phénomène appelé « la seconde urbanisation » par certains archéologues (Akkermans, Schwartz, 2003) se manifeste à travers la Syrie par l'apparition de grandes villes fortifiées. Celles-ci possèdent plusieurs villes et villages satellites et une société gouvernée par une élite hiérarchisée qui entreprend des travaux de construction monumentaux religieux et publics. Elles sont caractérisées par leur système d'administration complexe qui nécessite l'emploi de l'écriture pour pouvoir gérer le surplus de production et le commerce ainsi que de la main-d'œuvre qui dépend de l'élite (Akkermans, Schwartz 2003 ; 232). Cette organisation en cités états qui se répand en Syrie à partir du 26^e siècle av. J.-C. est attestée dans les archives royales d'Ebla en Syrie occidentale à quelques kilomètres au sud d'Alep. Découverts dans le Palais G de cette ville, ces documents décrivent le fonctionnement de l'administration interne de cet établissement avec les milliers de fonctionnaires et d'artisans qui y sont rattachés. (Archi 1982). La présence de 22 kg de lapis-lazuli dans une des pièces du palais atteste de l'existence de réseaux commerciaux qui s'étendent jusqu'en Afghanistan, qui est considéré comme la source unique de ce matériau à cette époque. À ce titre, l'étain et possiblement l'or auraient pu être importés de cette même région.

Au 24^e siècle av. J.-C., la Syrie subit le joug de l'empire Akkadien. Cette invasion, connue à partir des sources de l'époque, est également attestée archéologiquement par les niveaux de destruction des palais et des temples d'Ebla, de Mari et de Tuttul, situé à l'embouchure du Balikh (Akkermans, Schwartz 2003 ; 278). Cependant, hormis Tell Brak (Mallowan, 1947), très peu de preuves témoignent de l'existence d'une autorité akkadienne directe sur la Syrie. Un siècle et demi après sa création, l'empire Akkadien finit par s'écrouler et le Levant semble sombrer dans une soi-disant période de « crises » qui dure du dernier quart du 3^e millénaire jusqu'au début du 2^e millénaire (Schwartz 2005). De nombreux sites présentent des niveaux de destruction (Ebla, Tell Qannas, Byblos, Arqa...), d'autres sont réduits à de simples villages ou abandonnés (Banat, Leilan, Qara Quzaq, Beydar...). En Palestine plusieurs villes sont abandonnées à partir du 24^e siècle (Huot *et al.* 1990 ; 96-97). Quant à l'origine de ce phénomène, encore mal compris, plusieurs hypothèses ont été proposées selon la région concernée : Weiss *et al.* (1993), en se basant sur une l'étude de la micromorphologie menée à Leilan et sur quelques sites environnants dans les plaines de Khabur, considèrent qu'une longue période d'aridité a mené le système agricole à l'effondrement et par conséquent, au déplacement des populations de la Syrie vers la Mésopotamie du Sud. D'ailleurs, l'étude des isotopes d'oxygène d'un spéléothème de Nahal Soreq en Palestine semble affirmer l'existence d'une période de sécheresse dans cette région entre 2200 et 2000 av. J.-C. (Bar-Matthews *et al.*, 1999). Ce phénomène climatique a aussi été détecté par des études palynologiques portant sur le lac Hula au nord de la Palestine pour une période à peu près similaire (Rosen, 1989 ; 250, d'après Seif, 2010 ; 187). Cependant, l'étude d'un spéléothème de la grotte de Ġ'ita au Liban (Verheyden *et al.*, 2008) indique que le climat du Mont Liban durant cette un période était plutôt humide, ce qui a amené Seif (2010 ; 194) à considérer que cette sécheresse en Palestine était un phénomène local au sud du Levant. D'après Wilkinson (1994), le remplacement d'un système de rotation culturale par une exploitation continue du terrain agricole en utilisant des engrais, aurait conduit à l'appauvrissement du sol en humidité. Ainsi, durant une période d'aridité, le système agricole fragile se serait effondré et aurait provoqué la dissolution des communautés urbaines associées. Plusieurs hypothèses concernant l'action de l'homme sur l'environnement en Syrie ont été avancées, sans qu'aucune ne soit suffisamment satisfaisante pour qu'elle soit adoptée comme cause principale de cette période de « crises ». En Palestine, Kenyon (1960, 1965, 1966) remarque à partir des fouilles de Jéricho plusieurs groupes de tombes caractérisés par différentes architectures et offrandes. Elle considère que certains de ces groupes sont d'une culture étrangère à la Palestine. Ainsi, elle attribue cette culture aux Amorrites, nomades venus de la steppe syrienne, qui seraient responsables de la destruction et de l'abandon des sites urbains en Palestine. D'après Dunand (1973), une conquête Amorrite entre 2150 av. J.-C. et 2000 av. J.-C. serait à l'origine de la destruction des temples de Byblos et de l'introduction de nouveaux types de maisons et de céramiques. Cependant, plusieurs archéologues

contestent l'idée de l'arrivée d'une nouvelle population qui aurait, en certains endroits, remplacé la population locale¹. Par exemple, plutôt qu'une rupture, certains voient une continuité et un renouvellement de la culture précédente et l'assimilation d'éléments provenant de la Syrie dont l'influence est présente depuis plusieurs siècles (Huot *et al.* 1990). D'autres proposent une infiltration pacifique dans les villes où éventuellement ils auraient assumé le pouvoir ou le fondement de leurs propres royaumes comme à Alep, à Qatna en Syrie de l'ouest (Lafont 2009). Dever (1980) propose de considérer les Amorrites comme des populations indigènes de la région dont une partie se déplaçait, depuis bien avant la fin du 3^e millénaire av. J.-C., le long des steppes arides. L'existence et la cause de cette ou de ces « crises » sont toujours un sujet de débat et de recherche au sein de la communauté scientifique. Quoi qu'il en soit, au début du 2^e millénaire, plusieurs grands sites Levantin et Mésopotamien sont gouvernés par des souverains aux noms amorrites.

Les premiers 400 ans de ce 2^e millénaire av. J.-C., correspondant au Bronze Moyen, sont marqués par la régénération de la culture urbaine, la réoccupation des grands centres abandonnés durant la période précédente et l'affirmation du système cité état. De nouvelles puissances régionales apparaissent comme Alep et Qatna en Syrie de l'Ouest, Mari en Syrie de l'Est et Eshnunna, Babylone, Isin, Larsa et Ekallatum en Mésopotamie. Elles s'engagent, durant à peu près 3 siècles, dans une lutte de pouvoir, qui se termine par la destruction de Mari et la suprématie de Hammourabi de Babylone sur toute la Mésopotamie aux alentours de 1760 av. J.-C. La période des royaumes Amorrites s'achève vers 1595 av. J.-C. avec l'invasion des Hittites, peuple venu d'Anatolie centrale, qui met fin au royaume d'Alep et s'empare de Babylone (Akkermans, Schwartz, 2003).

Durant le Bronze Moyen les échanges à longue distance deviennent plus réguliers et les villes levantines profitent de leur position intermédiaire entre la Mésopotamie, l'Anatolie et l'Égypte (Huot 2004). Des objets portant les noms des pharaons égyptiens des XII^e et XIII^e dynasties ont été découverts à Ebla, Qatna, Ugarit et Byblos (Huot *et al.* 1990). Les textes du 18^e siècle de Mari montrent l'existence de relations diplomatiques et commerciales directes entre cette ville et Byblos, Ugarit et Hazor en Palestine (Lafont 2009). Comme à l'époque précédente, les villes du Bronze Moyen sont fortifiées ; en général elles sont protégées, soit par des murs et des glacis, soit par des levées de terre comme à Ebla, Qatna et Hazor au nord de la Palestine. L'accès aux villes se fait par des portes fortifiées en tenailles, constituées d'un bastion carré ou rectangulaire à étage avec un passage flanqué de deux ou trois paires de pilastres. Les palais et les temples occupent des surfaces de plus en plus importantes. En Syrie de l'Ouest et en Palestine les temples *in antis* sont la norme.

¹ Pour une synthèse sur les différentes hypothèses concernant les Amorrites à cette période en Palestine, le lecteur peut se référer à Dever (1980).

Constitué d'un bâtiment rectangulaire avec un porche donnant accès à une ou deux pièces, ce type de temple syrien, connu depuis la fin du 3^e millénaire par des exemplaires de taille réduite, acquiert des dimensions importantes et des murs épais qui évoquent la possibilité de l'existence d'un ou plusieurs étages. La langue officielle des royaumes amorites est l'akkadien écrit en cunéiforme. D'après Dunand (1973), Byblos, du fait de sa longue relation avec l'Égypte, maintient l'utilisation de l'écriture hiéroglyphique qui sera remplacée par le pseudo-hiéroglyphique.

Bien que Byblos et Arqa aient subi des destructions au 22^e siècle, puis à la fin du 21^e av. J.-C., les archéologues constatent une continuité dans l'occupation accompagnée d'une reconstruction rapide des lieux sacrés. Au début du 2^e millénaire, le *temple de la Ba'alat* et le *temple en L* sont toujours fonctionnels bien que quelques modifications architecturales aient été apportées au cours de la dernière reconstruction. Le *temple en L* du Bronze Moyen est désigné par les archéologues comme le *temple aux obélisques* du fait des 26 monolithes en pierre qui remplissent une de ses pièces. Cet édifice a livré plusieurs offrandes constituées d'armes et de statuettes en alliages cuivreux et en métaux précieux ainsi que des figurines en faïence. D'ailleurs, les niveaux du Bronze Moyen de Byblos sont caractérisés par l'abondance des offrandes trouvées dans les temples et les tombes ; le *temple aux champs d'offrandes* a livré 22 dépôts contenant plus d'un millier d'objets dont la plupart sont en alliages cuivreux (Dunand 1954). Un mobilier funéraire en métaux précieux et en obsidienne présentant les noms de pharaons de la XII^e dynastie a été mis au jour dans les tombes royales. Celles-ci sont supposées être au-dessous d'un palais à l'ouest de la zone sacrée (Montet 1928, Nigro 2009). Les objets en métal témoignent d'un artisanat élaboré local dont les archéologues ont découvert quelques traces qui se manifestent par des fragments de moules. D'autres sites révèlent que l'architecture monumentale, caractéristique du développement urbain de cette période, est présente sur la côte libanaise : Tell Al-Burak, à 9 km au sud de Sidon, présente un complexe architectural dont la peinture murale suggère qu'il s'agit probablement d'un palais (Kamlah, Sader, 2009). Une structure, d'une longueur de 16,5 m, dont le plan et les installations peuvent évoquer un temple a été découverte à Beyrouth (Bader 1997, 2009).

Malgré la rivalité incessante entre les royaumes Amorrites, le Bronze Moyen est caractérisé par l'épanouissement d'une culture assez homogène dans tout le Levant, mais qui présente en même temps des variétés régionales. La création de nombreuses cités-états associée à une structure sociale complexe, gouvernée par une élite, et à l'intensification des échanges commerciaux a contribué à la vaste circulation des biens et des idées, à la diffusion de l'architecture palatiale et religieuse ainsi qu'à l'épanouissement de l'artisanat.

Chapitre 2

Les sites étudiés et leurs contextes archéologiques

1.2-Les sites

Des armes du Bronze Moyen ont été mises au jour sur au moins neuf sites (Fig. 3) répartis sur toute la longueur du Liban. Au sud, des tombes découvertes dans la ville de Sidon ont livré au moins quinze armes (Doumet-Serhal, 2004a, 2004b). Trente autres armes, provenant de contextes similaires mis au jour à Ruweisé, Lebe'a à proximité de Sidon, ont fait l'objet de deux publications par Guigues (1937, 1938). Les tombes découvertes dans la région de Beyrouth, comme à Sin el Fil (Chehab, 1939) et à Khariji (Saidah, 1994), ont livré au moins 45 de ces objets. Une arme a été découverte sur le site de Yanouh (Monchamber et al., 2010) et une autre sur le site de Hourieh - Karem Saddeh (Beaino *et al.*, 2002), situés dans/sur le Mont Liban. Au nord, cinq armes ont été mises au jour sur le site de Tell Arqa (Thalmann 2006, Gernez 2010). Dans tous ces sites, les armes proviennent de contextes funéraires. Byblos constitue la seule exception où 600 exemplaires ont été retrouvés dans des dépôts situés dans des temples ou dans d'autres contextes plus ou moins définis (Dunand, 1939, 1954). Nous n'avons pu avoir accès qu'aux armes découvertes à Byblos, Tell Arqa, Yanouh et Khariji.

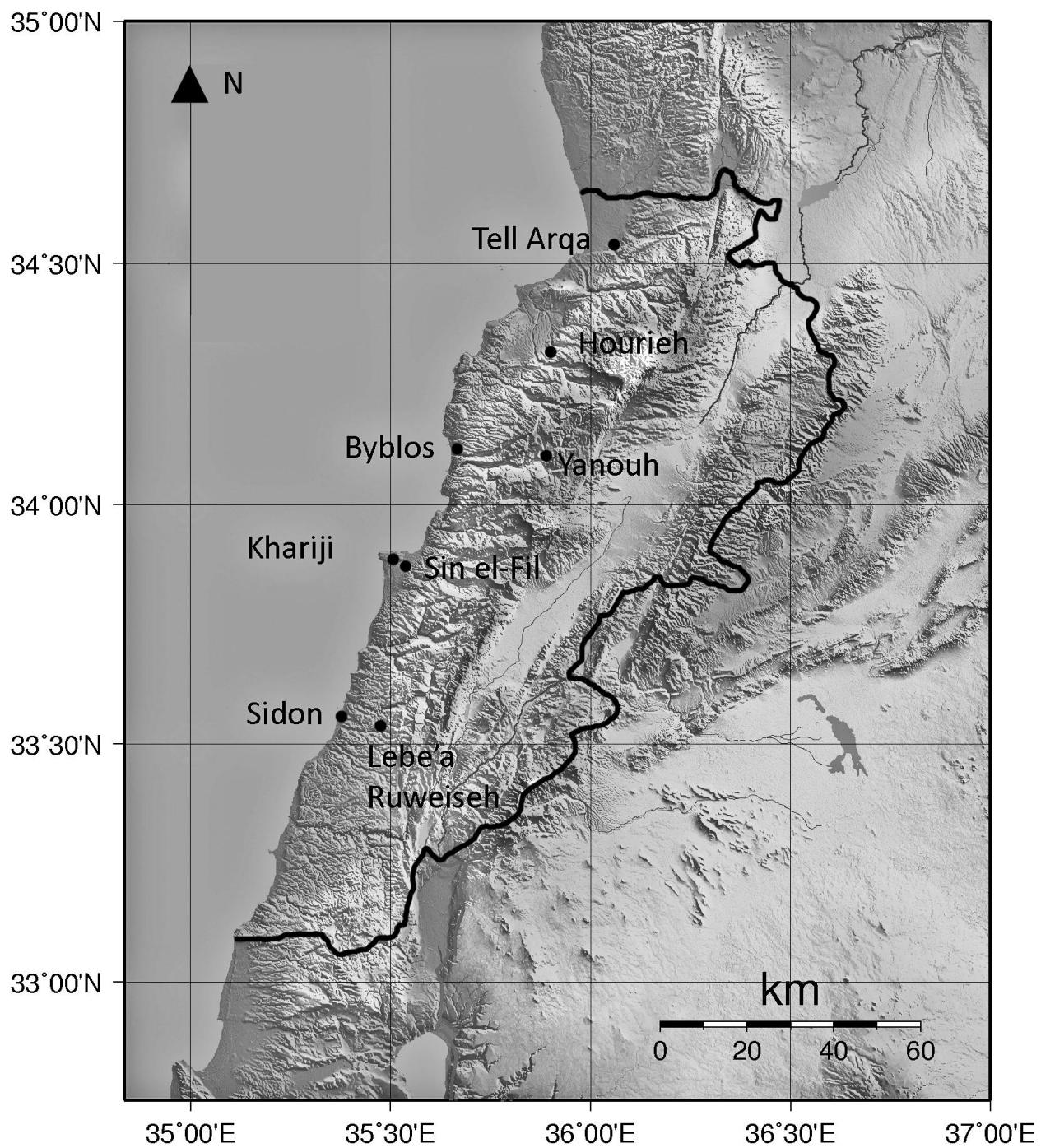


Figure 3: Carte de la République Libanaise présentant des sites qui ont livré des armes du Bronze Moyen.

1.2.1-Byblos

Le site archéologique de Byblos² est localisé sur la côte est de la Méditerranée dans l'actuelle ville de Jbeil, située à 45 km au nord de la capitale Beyrouth. Il est installé sur un promontoire rocheux, d'une trentaine de mètres de hauteur, bordé de falaises vives. Au nord, il est flanqué par une petite crique d'une largeur de 120 m et d'une longueur de 60 m (Saghieh, 1983). Au sud du promontoire se trouve la baie sablonneuse d'El Skhiny, emplacement présumé de l'ancien port de Byblos (Frost et Morhange, 2000). A quelques kilomètres au sud du site se trouve la rivière de Nahr-Ibrahim. A l'est, le site est surplombé par le Mont Liban qui constituait autrefois une source de gibiers et de bois de cèdres, mais également de pins, de cyprès et d'autres arbres.

L'occupation ininterrompue du site pendant près de 7000 ans a conduit à la formation d'un tell de 12 m de haut, présentant une surface totale de 10 hectares (Dunand, 1973). Les premières fouilles sur le site ont été entreprises par Ernest Renan (1864), entre 1860 et 1861 ; il a dessiné des vestiges visibles, fouillé une nécropole et creusé 2 tranchées desquelles a été récupéré du matériel archéologique. Entre 1920 et 1924, Pierre Montet entreprend 4 campagnes de fouille sur le site. Les travaux consistaient à effectuer des sondages pour rechercher d'anciennes structures et des objets archéologiques. Il a mis au jour deux sanctuaires du Bronze Ancien, une nécropole royale et des tombes du Bronze Moyen, des tombes préhistoriques et un ensemble de constructions romaines (Montet 1928). Les seules fouilles systématiques entreprises ont été effectuées par Dunand, qui de 1926 jusqu'à 1975, dégage la quasi-totalité du site. La méthode de fouille de Dunand consistait à décaper des couches horizontales de 20 cm, appelées « levées ». Au début de ses travaux, l'archéologue a divisé le site en rectangles, de dimensions différentes, ayant chacun un numéro (Dunand, 1939). Ensuite, le site a été divisé selon une grille constituée de carrés de 10 m de côté. Chaque carré est identifié par un numéro d'abscisse et d'ordonnée. Selon Dunand (1954, 4-7), la méthode de fouille qu'il a adopté permet d'enregistrer la position tridimensionnelle de chaque objet et de chaque élément architectural sans interférence avec le préjugé du fouilleur. Ainsi, chaque chercheur peut reconstituer, selon ses propres interprétations, les différentes structures architecturales grâce aux données publiées. Cependant, cette méthode rejette toutes les données que l'étude stratigraphique des sédiments archéologiques peut apporter. Elle ne permet pas d'établir une relation chronologique et spatiale entre les différents vestiges

² Le nom « Byblos » est l'appellation donnée par les Grecs à la ville. Elle est mentionnée sous le nom de « Goubla » dans les lettres de tell Al-Amarna, « Gebal » dans l'Ancien Testament, « Giblel » lors des Croisades et « Jbeil » par les Arabes (Jidejian 1968).

du site. Il est donc impossible de définir la nature des contextes archéologiques de la plupart des objets découverts hors d'un contexte scellé comme une tombe, un dépôt ou sur un sol d'une structure architecturale. Dans la plupart des cas, ces contextes ont été datés par les objets qu'ils renferment, surtout lorsqu'ils portent des inscriptions hiéroglyphiques avec les noms des pharaons.

Les différents plans du site publiés par Dunand (1939, 1954) présentent des éléments architecturaux et des objets découverts sur une profondeur d'un mètre sans tenir compte de la cohérence chronologique de l'ensemble.

Ainsi, la reconstitution du plan de la ville sur la période du Bronze Moyen I était irréalisable dans le cadre de cette étude ; nous n'avons disposé ni du temps ni des documents nécessaires pour l'effectuer.

Des analyses stratigraphiques du site ont été réalisées et publiées pour la première fois par M. Saghieh (1983). Elles ont porté essentiellement sur les principales unités architecturales datant de la fin du 4^e millénaire jusqu'au début du 2^e millénaire. L'auteur associe les différentes évolutions de ces unités architecturales à quatre phases chronologiques principales (L, K, J et H) ; il offre pour la première fois un plan de la ville au Bronze ancien III et un autre au Bronze ancien IV correspondant respectivement aux périodes K III/IV et J I/II (Saghieh, 1983 ; Plan 1 et 2). Lauffray (2008), en se basant sur les documents de Dunand, publie une étude de toutes les constructions du site appartenant au Bronze Ancien. En se basant sur le style et les techniques de construction, il a déterminé quatre phases architecturales dont chacune est représentée sur un plan séparé. Ces plans sont généralement plus complets que ceux de Saghieh (1983).

Les études réalisées sur Byblos permettent de supposer que, au cours du Bronze Moyen I, la ville de 5 ha de surface était délimitée du côté nord, est et sud par des fortifications et du côté ouest par la mer. Au cœur de la ville (Fig. 4) se trouve la source sacrée autour de laquelle s'organisent plusieurs structures à caractère religieux (Dunand, 1973 ; 25-26, Saghieh, 1983 ; 1) comme le *temple aux obélisques* à l'est de la source, *l'enceinte sacrée* au nord-ouest, le *temple de la Baalat Gebal* (ou *bâtiment II*) au nord et la *chapelle orientale* du côté est du *temple aux obélisques*. L'entrée de la ville est située à 30 m au nord-est de ce dernier.

Au vu des problèmes de stratigraphie et de contextes archéologiques nous avons essayé d'étudier les armes découvertes dans des contextes archéologiques scellés, comme les dépôts d'offrandes et les tombes. Cependant, à cause de l'impossibilité d'effectuer des prélèvements sur quelques objets en très bon état ou à l'inverse complètement corrodés, nous avons parfois été contraints d'étudier des objets dont le contexte archéologique n'est pas défini, mais dont la typologie nous permet de les attribuer à une période. Dans les paragraphes qui suivent nous

présenterons les contextes ou les localisations des différentes armes de Byblos faisant partie de notre corpus.

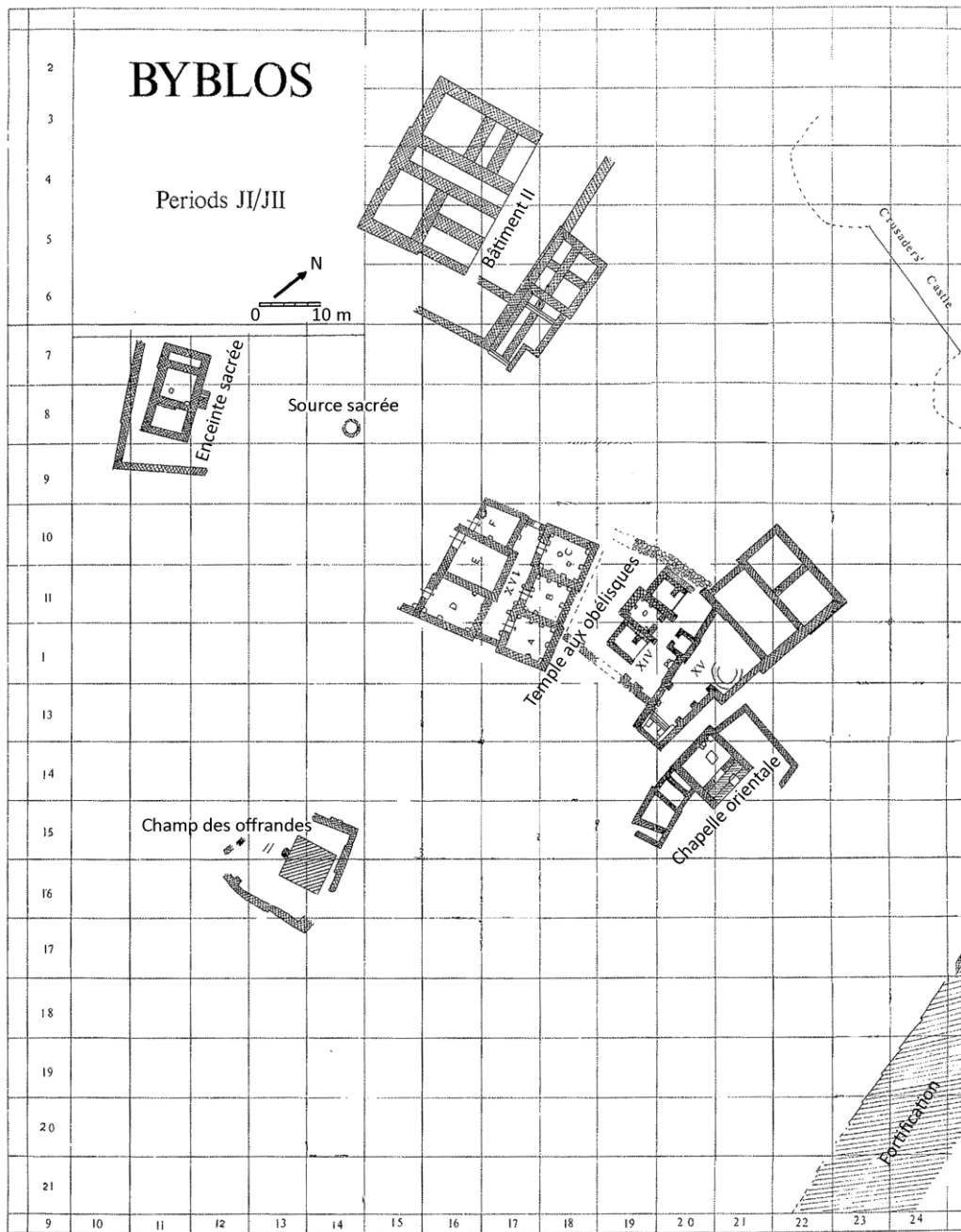


Figure 4 : Plan simplifié du site de Byblos d'après le plan de la période J I/II fait par Saghieh (1989, plan 2). Il présente la localisation des principales structures religieuses du Bronze Ancien IV. Ces structures demeurent utilisées durant le Bronze Moyen, cependant des modifications au niveau du plan architectural ont été détectées. La grille présentée dans le plan de site correspond à celle que Dunand (1950) a utilisée et publiée dans « Fouilles de Byblos II ».

1.2.1.1- Les dépôts d'offrandes

Les dépôts en question ont été découverts par Dunand (1954) dans une structure interprétée par l'archéologue comme étant un temple. Le peu de murs restant de ce bâtiment, désigné par le *champ des offrandes*, a permis à Dunand (1954 ; 394) d'identifier « un naos dans une cella construite à l'intérieure d'une aire sacrée entourée d'un péribole irrégulier ». Le *champ des offrandes* est situé à une quarantaine de mètres au sud-est de la source (Fig. 4). Il a livré vingt-deux dépôts, contenant au moins 1050 objets en alliages cuivreux, en métaux précieux, en pierre, en terre cuite, en ivoire et en os. La majorité de ces objets est constituée de figurines (313 individus) et d'armes (425 individus) en alliages cuivreux. Dans la plupart des cas, le dépôt a été rangé dans un récipient en céramique conçu spécialement pour cette fonction (Fig. 5 A). De plus, certains dépôts ont été placés dans des jarres, supposées à usage domestique par l'archéologue, ou directement enterrés dans le sol (Fig. 5 B, C). Dunand (1954) a désigné chaque dépôt par une lettre de l'alphabet grec. La répartition des objets dans les dépôts, où les uns sont constitués majoritairement d'armes et les autres de figurines, a amené l'archéologue à interpréter chaque dépôt comme étant un don fait au temple par un individu ou un groupe. Ce don aurait été exposé au temple pendant un certain temps pour ensuite être enterré dans le sol du temple (Dunand, 1954 ; 394). Selon Dunand, les deux jarres (ν et ϕ) ayant servi de réceptacle aux objets déposés peuvent être attribuées au Bronze Moyen 2. De surcroît, il attribue des tasses à anse trouvées dans le dépôt γ et le scarabée découvert dans le dépôt ι à la fin de la XII^e dynastie égyptienne. Ainsi, il propose que ces dépôts datent du XVIII^e siècle av. J.-C. (Dunand, 1954 ; 396).

Negbi et Moskowitz (1966) s'accordent avec Dunand sur la date de ces dépôts. De plus, ils attribuent tous les dépôts trouvés dans le *temple aux obélisques*, dans l'*enceinte sacrée* et dans le *temple de la Baalat Gebal*, à la même période. Cependant, ils utilisent les mêmes arguments que Dunand pour interpréter ces vestiges comme étant des cachettes et non pas des dépôts d'offrande ; les récipients en terre cuite, conçus pour recevoir les objets, auraient été fabriqués pour faciliter le rangement du trésor du *temple de la Baalat Gebal* et du *temple aux obélisques*, soit dans les temples mêmes, soit dans des entrepôts. Durant le XVIII^e siècle, tous ces dépôts auraient été cachés dans les sols des temples à cause d'une « catastrophe » qui aurait conduit la dynastie locale de Byblos à s'éteindre. Cependant, quelques propos de Negbi et Moskowitz (1966) peuvent être utilisés comme contre-arguments à leur hypothèse. Ces deux auteurs mentionnent le fait que des objets ressemblant aux objets des dépôts ont été découverts sur le sol du temple, et donc ils postulent que certains trésors n'étaient pas cachés. Ainsi nous pouvons argumenter que, si durant une période d'instabilité les trésors des temples ont été cachés, des objets de valeurs ne devraient pas se trouver sur les sols des temples où ils sont facilement accessibles. De même, les objets en alliages cuivreux et les feuilles en or, trouvés dans les chambres annexes du *temple aux obélisques* (Dunand, 1954 ; 898), auraient

été inclus dans ces cachettes. De plus, il nous semble assez douteux que la vaisselle (dépôts γ , σ et u) et les figurines (dépôts α et γ) en terre cuite soient des objets aussi précieux pour être cachés dans le du *champ aux offrandes*. Celles-ci révèlent plutôt le caractère religieux de ces dépôts.

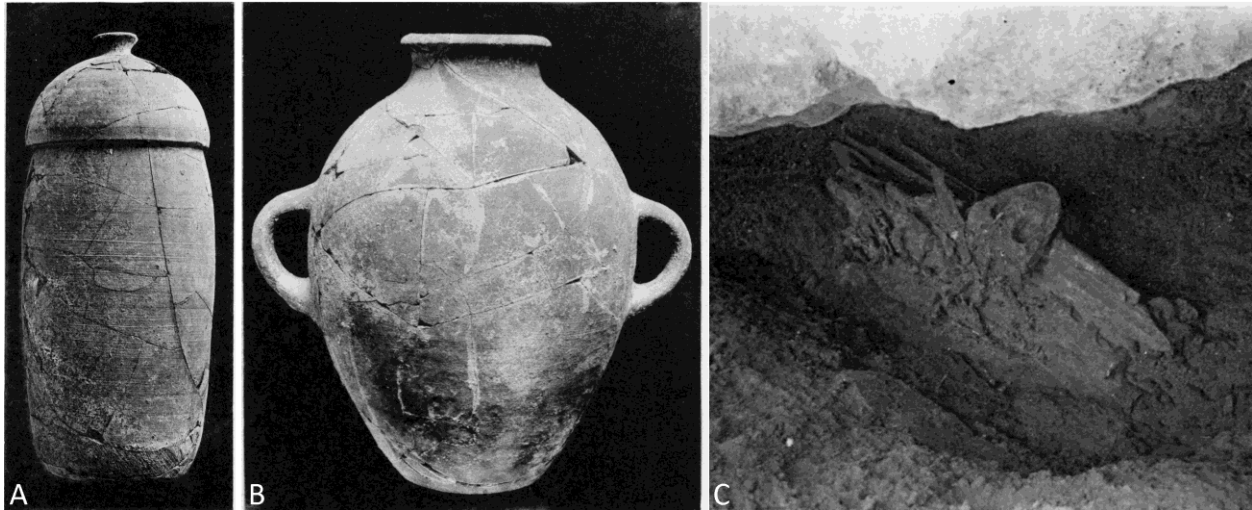


Figure 5: A- récipient en céramique à couvercle fabriqué dans le but de recevoir le dépôt χ (Dunand, 1954; 390, 1950 ; pl. 128). Il présente une hauteur de 32 cm et une largeur maximale de 21 cm. B- Jarre qualifiée par Dunand (1954 ; 394) comme domestique utilisée comme réceptacle du dépôt v . Elle présente une hauteur de 33 cm et une largeur maximale de 24 cm (Dunand, 1954 ; 305, 1950 ; pl.116). C- le dépôt ϵ , enterré directement dans le sol (Dunand 1954 ; 218, 1950 ; pl. 139).

Philip (1988) s'accorde avec Dunand sur la nature de ces dépôts et propose dans son étude de la typologie des armes (Philip, 1989 ; 39-40) qu'ils soient datés de la première moitié du Bronze Moyen I (2000-1800 B.C). Ses arguments sont basés sur la typo-chronologie des haches à collet et lame étroite encochée qu'il désigne par Type 1 et des poignards à sillon ou filets multiples (Type 13). Ces deux types d'armes apparaissent au Levant durant la deuxième moitié du Bronze Moyen I. Ils ont été trouvés sur plusieurs sites en Palestine et au Liban. Plusieurs exemplaires de ces armes ont été mis au jour à Byblos. De plus, la présence d'un moule pour la fabrication des haches de Type 1 atteste de leur production sur ce site. L'absence de ces types d'armes dans les dépôts d'offrandes qui contiennent généralement des armes typiques du Bronze Moyen I montre que la pratique d'enfouissement des dépôts s'est arrêtée avant l'apparition de la hache de Type 1 et des poignards de Type 13 à Byblos. La présence d'armes comme la hache fenestrée large et la lance tripartie à lame renflée et soie recourbée

dans les dépôts u et o pourrait repousser la limite chronologique inférieure des dépôts jusqu'à la fin du Bronze Ancien IV (Gernez 2007 ; 191, 313).

Saghieh (1983 ; 38) se base sur la stratigraphie du *champ aux offrandes* pour postuler que les dépôts sont contemporains avec deux structures qui les auraient probablement abrités. Elle suppose donc que les enfouissements de ces différents dépôts se sont faits sur une longue période. Elle attribue l'ensemble des dépôts à sa période H qui commence aux alentours de 2050 av. J.-C. (Saghieh, 1983 ; 132) et couvre l'ensemble du Bronze Moyen I.

La plupart des arguments cités ici indiquent que ces dépôts appartiennent au Bronze Moyen I. Cependant, l'absence d'une étude stratigraphique des couches archéologiques empêche une datation plus précise. Ainsi, dans l'état actuel de nos connaissances nous préférons attribuer ces dépôts au Bronze Moyen I, et les considérer comme étant des dépôts d'offrandes. Ce dernier terme, « dépôts d'offrandes », a été utilisé par plusieurs auteurs pour l'ensemble des dépôts retrouvés dans le *temple aux obélisques*, *champ aux offrandes*, *l'enceinte sacrée* et dans le *temple de la Baalat Gebal* (Negbi et Moskowitz, 1966, Philip, 1988). Dans cette étude nous retenons ce terme uniquement pour les dépôts du *champ aux offrandes*. Soixante-et-une armes provenant de ces dépôts ont été incluses dans notre corpus.

1.2.1.2- Les tombes

Deux haches fenestrées étroites, n°8349 et 9076³, découvertes dans une tombe de Byblos, ont été intégrées dans notre étude. Découvertes par Montet (1928) durant sa quatrième campagne de fouille en 1924, cette tombe est désignée par « tombeau de particuliers III ». La localisation exacte de cette tombe n'est pas précisée sur un plan du site. Selon Montet (1928 ; 22-23), elle a été retrouvée « sur le flanc sud de la colline presque au bord de la mer ». Elle a livré de la vaisselle en terre cuite, un fragment en albâtre appartenant probablement à un vase, un scarabée et cinq armes en alliages cuivreux. Ces armes consistent en une pointe de lance à douille, deux objets qualifiés par l'archéologue comme des pointes de lances, dont une est sans doute un poignard, et les deux haches étudiées ici. Aucune description concernant les ossements qui ont dû être trouvés n'est disponible dans les publications de Montet (1925, 1928). Cependant, le nombre de haches fenestrées suggère la présence d'au moins deux individus mâles enterrés dans cette tombe ; dans ce type de tombes, dites « de guerrier », caractéristique du Bronze Moyen, un individu est souvent accompagné d'une seule hache, d'un poignard et d'une ou deux pointes de lances (Philip, 1995, Gernez, 2007 ; 624). Aucune tombe jusqu'à présent n'a livré un défunt accompagné de deux haches

³ Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban).

fenestrées. Selon Montet (1928 ; 248), les jarres trouvées dans cette tombe sont semblables à du matériel contemporain de la XII^e dynastie égyptienne. La présence de haches fenestrées étroites permet d'attribuer ces tombes au Bronze Moyen I (Gernez 2007 ; 196).

1.2.1.3- Les contextes mal définis

La hache fenestrée étroite 8350 a été retrouvée dans la levée XVIII du carré 9/11. Elle est associée à un lot contenant deux haches plates allongées. Selon le plan du site de Dunand (1950, carte de la côte 25 à 24), le lieu de découverte de ce lot est situé dans la cour de l'*enceinte sacrée*. D'après les coupes stratigraphiques de Saghieh (1983 ; fig. 11), ce niveau de l'enceinte sacrée correspond à la phase 3 de la période H, de cet auteur, correspondant au Bronze Moyen I.

D'après Dunand (1954 ; 1005), le poignard 10831 a été découvert dans la levée XXIII du carré 11/22. Un matériel constitué de sept objets en argent, de sept figurines en alliages cuivreux, d'un perçoir en silex, de deux figurines en terre cuite, et de dix récipients en terre cuite, a été trouvé au même endroit et dans la même levée. Cet emplacement correspond à une chambre située dans le coin nord-est du temple qui a précédé le *temple aux obélisques* (Dunand, 1954 ; 898). Le niveau du temple dans lequel a été trouvé ce poignard correspond probablement à la deuxième moitié du Bronze Ancien IV (Saghieh, 1983 ; Fig. 7). Ceci, comme dans le cas de la hache 8350, ne constitue pas une preuve que le poignard appartient à cette période. Comme nous l'avons déjà mentionné, l'étude stratigraphique de Saghieh (1983) concerne principalement les structures architecturales. Le manque de description des emplacements de ces objets ne nous permet pas de déterminer s'ils ont été trouvés *in situ*, ou s'ils proviennent d'un contexte perturbé. Dans le cas où il provient d'un contexte non-perturbé, il est impossible de savoir si le poignard était déposé sur le sol de la pièce ou dans une fosse d'un niveau supérieur. Le poignard 10811 a été retrouvé dans la salle C du *bâtiment II* au niveau de la levée XIX. Ce niveau pourrait appartenir à la fin du Bronze Ancien IV (Gernez 2007 ; 504). La pointe de lance 10870 a été découverte dans le carré 8/12 durant la démolition des murs des levées XI jusqu'à XV. La position des objets récupérés durant la démolition des murs n'est pas précisée sur les plans de Dunand. Cependant, il faut préciser que l'entrée de l'enceinte sacrée, qui apparaît à partir de la levée XVI, est située dans ce carré. Il ne faut pas donc écarter la possibilité que cette pointe de lance provienne à l'origine du matériel de ce temple. Cependant, au vu de la technique de fouille, il n'est pas possible d'attribuer cette arme à un contexte archéologique précis. La hache fenestrée large 6320 a été trouvée dans le carré 14/22, au-dessus de l'emplacement de la *chapelle orientale*, au niveau de la levée VII. D'après Dunand (1939), la pointe de lance 10810 a été découverte dans la démolition des murs des levées XI à XX sans aucune autre précision. La hache fenestrée 10974 ne figure pas dans les publications de

Dunand, mais elle a été récemment retrouvée avec le matériel de Byblos dans les dépôts de la Direction Générale des Antiquités Libanaise (Gernez 2007).

1.2.2- Tell Arqa

Le site d'Arqa est situé dans la partie sud de la plaine d'Akkar, à 70 km au nord de Byblos, et à peu près 110 km de Beyrouth. Le tell présente une altitude maximale de 147 m et une superficie de 7 hectares à sa base et de 4,5 hectares à son sommet (Thalmann, 2006). Au sud du site passe le Nahr (fleuve) Arqa et à 12 km au nord se trouve le fleuve du Nahr el-Kebir. L'emplacement de ce tell dans une plaine fertile ainsi que sur la route connectant le littoral et l'intérieur de la Syrie, via la trouée de Homs, a favorisé l'occupation quasi-continue du site à partir du VI^e millénaire BC jusqu'à l'époque mamelouk (XIII^e-XVI^e siècle AD).

Le site a fait l'objet de fouilles systématiques dès 1972 sous la direction d'Ernest Will et ensuite de Jean-Paul Thalmann (Thalmann, 1978). Les travaux de fouilles ont été interrompus en 1981, et ce jusqu'en 1992, à cause de la guerre civile libanaise.

Les trois armes de notre corpus appartenant à ce site proviennent toutes de la tombe 14.14 (Thalmann, 2006 ; 34) découverte dans la partie orientale du site. La tombe (Fig. 6) est constituée d'une fosse rectangulaire, orientée est-ouest, de 2,30 m x 2,90 m de dimensions, et d'une profondeur de 1 m. Elle présente une paroi en pierres de petites dimensions, enduite d'une couche d'argile et de paille. La destruction de la tombe induite par sa réutilisation comme structure de cuisson de poterie n'a permis que la conservation de la partie sud-est. A cause de cette perturbation, les ossements trouvés dans cette tombe sont dans un état fragmentaire, ce qui ne permet pas de reconstituer la position du corps, ni le sexe du défunt. Selon la stratigraphie du site, cette tombe, découverte dans la couche 14D2, correspond donc aux premières décennies du II^e millénaire av. J.-C. (Thalmann, 2006 ; 44). La tombe a livré quatre armes en alliages cuivreux, une fiole en métal blanc non-ferreux et cinq céramiques. Les armes, découvertes dans le coin sud-est de la partie restante de la tombe, comprennent une hache fenestrée étroite, une pointe de lance à douille longue, une pointe de lance à douille courte et un poignard. L'ensemble des céramiques, localisé dans la partie sud-ouest, est composé de trois cruches à bec trilobé, d'un bol et d'un gobelet caréné. Elles sont toutes caractéristiques du début du II^e millénaire av. J.-C.

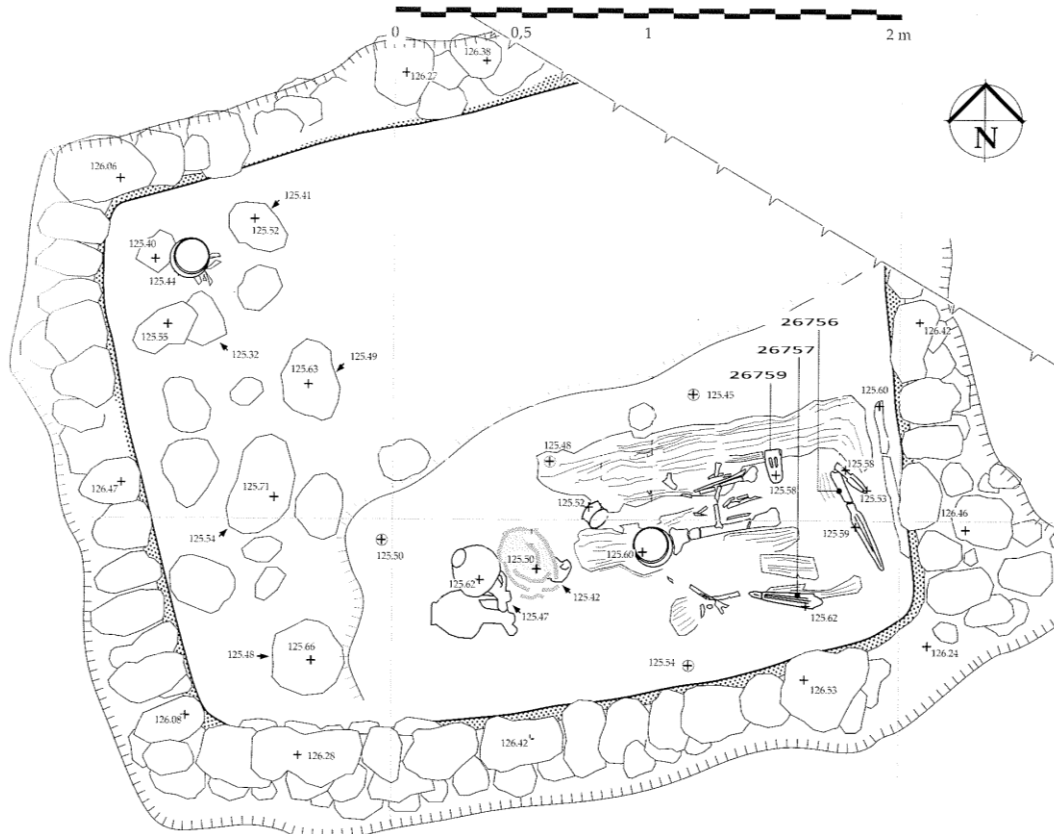


Figure 6 : Relevé topographique de la partie sud de la tombe 14.14 découverte à Tell Arqa (Thalmann, 2006 ; 35, Fig. 8).

1.2.3-Yanouh (Tell Kharayeb)

Le site de Yanouh est situé à 20 km à l'est de Byblos dans la vallée de Nahr Ibrahim du Mont Liban. Les travaux de fouille ont été effectués en 2006 sous la direction de J. Monchambert (Monchambert et al., 2010). Ces travaux consistent en deux sondages carrés, de 5 m de côté, et un sondage de forme rectangulaire, de 7 m de longueur sur 5 m de largeur. Ceux-ci ont livré des vestiges et des traces d'occupation humaine du Bronze Ancien III, du Bronze Moyen, de l'Age du Fer (milieu du I^e millénaire av. J.-C.), et des périodes byzantine et médiévale (entre le XIII^e et XIV^e siècle A.D.).

Une hache fenestrée étroite 77096 et une pointe de lance à douille 77137 provenant de ce site ont été ajoutées à notre corpus d'étude. La hache provient de la tombe E 304 (Fig. 7 a),

mise au jour dans le niveau 3 du sondage 3. Celui-ci a livré cinq tombes du même niveau dont deux d'entre elles, E 302 et E 303, contenaient chacune une cruche qui peut être datée du Bronze Moyen I. La tombe E 304 présente une orientation est-ouest, elle a été dégagée partiellement du côté est, et donc seule la partie supérieure du squelette a pu être étudiée. Le défunt est posé sur son côté gauche. Le sexe de cet individu n'a pas pu être déterminé, à cause de l'état dégradé du crâne et du dégagement partiel du squelette. La pointe de lance a été retrouvée contre un parement d'un mur (2028) byzantin ou médiéval découvert dans le niveau 2 du Sondage 2. La publication de Monchambert *et al.* (2010) ne nous permet pas de l'attribuer à un contexte clair. Le niveau 2 a livré surtout de la céramique byzantine et médiévale.

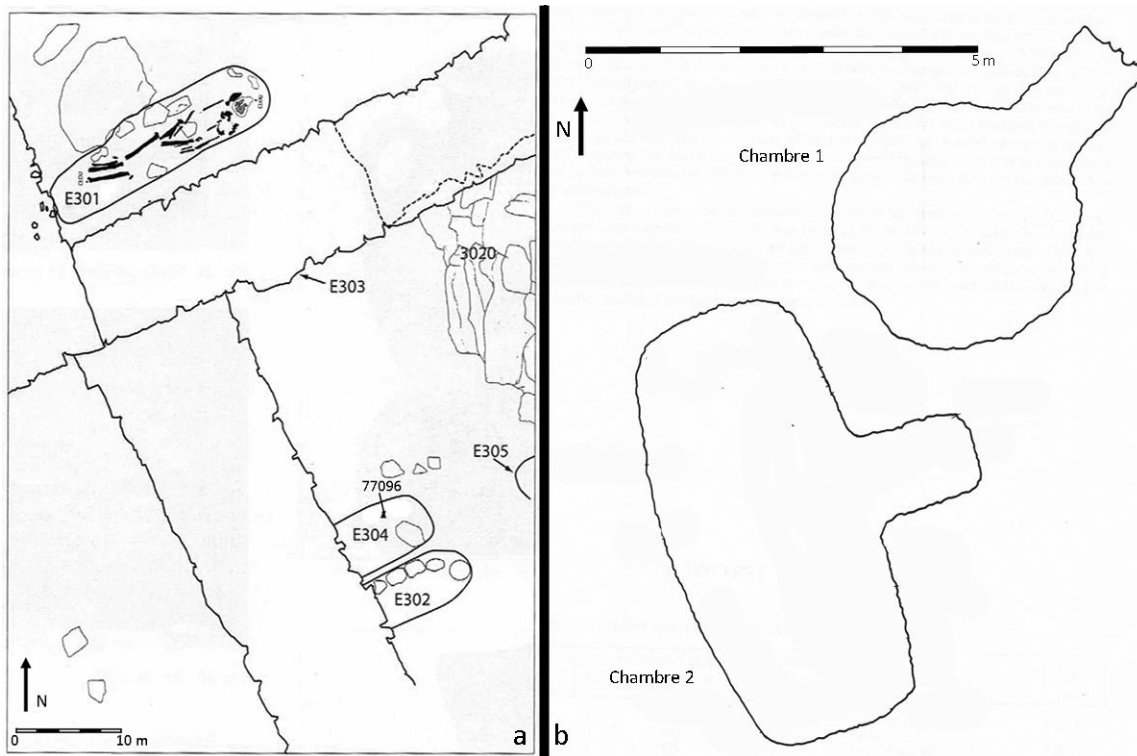


Figure 7: a- Plan des tombes trouvées dans le niveau 3 du sondage 3 du site de Yanouh (Monchambert *et al.*, 2010) ; b- Plan des chambres 1 et 2 mises au jour sur le site de Khariji (Saidah, 1994).

1.2.4-Khariji

Le site de Khariji est situé au nord-ouest de l'actuel centre-ville de Beyrouth. Découvert en 1954 par Roger Saidah, le site a fait l'objet d'une fouille de sauvetage. La documentation a été publiée plusieurs années après la mort de Saidah par H. Seeden et S. Masri (Saidah, 1994). Il consiste en une grotte présentant deux chambres funéraires (Fig. 7 b), de dimensions différentes, creusées dans la roche. La chambre 1, désignée aussi par tombe 1, T1 ou T1, présente un plan circulaire de 3,25 m de diamètre. La chambre 2 (TII, T2 ou tombe 2), de forme oblongue, a une longueur et une largeur maximale de 5,6 m et 2,7 m. Les deux chambres présentent une entrée rectangulaire du côté nord-est. Aucune information concernant les individus enterrés dans ces chambres n'est disponible. Elles ont livré 137 objets en céramiques, en pierre, en alliage cuivreux et en métal précieux. Parmi les objets en alliage cuivreux, au moins quarante-trois peuvent être considérés comme des armes. Bien que ce site ait livré un grand nombre d'armes, nous n'avons trouvé dans le Musée National de Beyrouth que quatre de ces objets, dont trois (56062, 56063 et 56064) ont été intégrés dans cette étude. Ils proviennent tous de la chambre 2. Selon Saidah (1994), les céramiques trouvées dans la chambre 2 appartiennent au Bronze Moyen. Les types des armes retrouvées dans cette chambre, comme la hache fenestrée étroite typique du Bronze Moyen I (Philip 1989 ; 49-50, Gernez 2007 ; 196) et les couteaux à talon utilisés du milieu du Bronze Moyen I jusqu'à la fin du Bronze Moyen II (Philip 1989 ; 141-142, Gernez 2007 ; 418), ne permettent pas d'affiner la datation de cette sépulture. Enfin, au vu de la variété et du nombre important d'armes retrouvées dans la chambre 2 (6 couteaux, 6 poignards, 4 pointes de lances à douille et une hache fenestrée), il n'est pas improbable qu'elle ait servi à l'inhumation de plusieurs individus et ce, sur toute la période du Bronze Moyen.

Chapitre 3

La typologie⁴ des armes

1.3.1-Les haches fenestrées

Les haches fenestrées sont des armes de choc et de taille utilisées de la fin du Bronze Ancien IV jusqu'au début du Bronze Moyen II. Elles sont recensées sur des sites de Mésopotamie, d'Anatolie et d'Égypte mais sont essentiellement concentrées dans la région du Levant. Cette région est considérée par certains chercheurs comme étant le foyer de production primaire (Gernez 2007). Ce type de hache se distingue des autres par la présence de deux ouvertures appelées fenestrelles situées entre la lame et le collet. Généralement, l'axe long du collet, perpendiculaire à celui de la hache, présente la partie la plus large. Le collet d'emmanchement a une forme intérieure légèrement conique. Cette forme évite le glissement de l'arme sur le côté inférieur du manche. Du côté supérieur, la hache est maintenue par un rivet, fixé dans la partie débordante du manche. La section de l'ouverture est ovale. Des exemplaires de manches provenant du site de Baghouz, situé à l'est de la Syrie et de Byblos (Du Mensil du Buisson 1948 ; Dunand 1950), présentent des longueurs entre 60 et 80 cm. La largeur est de 2 à 3 cm et l'épaisseur est de 1 à 2 cm (Gernez 2007).

Gernez (2007) a identifié quatre variantes principales suivant la forme et les dimensions de la lame. L'étude des caractères morphologiques lui a permis d'émettre l'hypothèse de l'existence probable d'un cinquième type :

- les haches fenestrées larges (H 4 A.) avec une largeur qui, de manière générale, est 1,4 fois plus grande que la longueur ;

⁴ Plusieurs typologies comme celles de Deshayes (1960), Maxwell-Hyslopp (1948), Miron (1992), ont été proposées pour les armes de l'Age du Bronze du Levant. Cependant nous n'utiliserons ici que celles de Gernez (2007) et de Philip (1989) qui sont les plus récentes et les plus complètes.

- les haches fenestrées étroites (H 4 B.) dont la longueur est 2 fois plus grande que la largeur. La lame a une forme rectangulaire avec un tranchant circulaire ;
- les haches fenestrées équilibrées (H 4 C.) où le rapport longueur /largeur est égal à 1 ;
- les haches fenestrées semi-circulaires à fenestrelles circulaires (H 4 D.). Elles diffèrent du type précédent par la forme et la taille de ces fenestrelles qui, comme le nom l'indique, sont petites et circulaires. Une autre caractéristique tient dans la décoration en filets sur l'axe médian, et autour des fenestrelles. Cette décoration est parfois appliquée sur le collet ;
- les haches semi-circulaires à une seule fenestrelle (H4.E). Comme le seul exemplaire est un fragment l'existence de ce type reste non-confirmée.

Philip (1989) classe les haches fenestrées selon 4 « Type » principaux : le « Type 1 » et le « Type 2 » correspondent respectivement aux haches H.4 B et H.4 A de Gernez, et le « Type 3 » comprend les haches H.4 C et H.4 D. Le « Type 4 » représente les haches fenestrées miniatures. Philip a aussi défini un « Type 5 » qui renferme les haches en « ancre » bien que Gernez (2007 ; 203) considère que ces haches appartiennent à un sous-type (H.5) différent que celui des haches fenestrées. Les haches fenestrées étudiées dans ce travail appartiennent au type H 4 B. (Type 1) et au type H 4 A. (Type 2). Pour faciliter la description, elles seront désignées simplement par hache fenestrée étroite (HFE) et hache fenestrée large (HFL).

1.3.1.1- Les Haches fenestrées larges

Désignées en anglais par « broad axes » ou « D-shaped axes », ces haches sont attestées dans des contextes datant de la fin du BA IV à la fin du BM I, c'est-à-dire probablement entre 2100 et 1800 av. J.-C. (Gernez 2007 ; 191). La majorité des exemplaires a été trouvée au Levant occidental, cependant quelques spécimens ont été découverts aussi loin qu'à Suse (Tallon, 1987 ; 110) en Iran, au site de Kom el Hisn (Brunton 1947 ; 144) en Egypte et à Kültepe en Anatolie (Özguç, 1986). Sur la soixantaine d'exemplaires trouvés, 31 proviennent de Byblos. Elles sont souvent rencontrées dans des dépôts d'offrandes des temples et rarement dans des tombes (Caspi *et al.*, 2009). Elles peuvent être en alliages cuivreux ou en métaux précieux comme celles trouvées dans le « dépôt aux ors » à Byblos (Dunand, 1954; 694-695).

Ces haches présentent une lame curviligne large avec un tranchant qui peut être biseauté. Philip (1989 ; 51) considère que les fenestrelles larges de ce sous-type rend le

collet assez fragile, doutant ainsi de l'utilisation de cette hache en combat. Plusieurs spécimens présentent une décoration abondante comme des rainures ou des filets autour des fenestrelles et sur l'axe médian ; plus rares sont les représentations figuratives en relief sur les lames. On trouve sur des haches de Byblos des décors zoomorphes d'inspiration égyptienne, ainsi que des scènes d'acrobatie ou de danse. Ces décorations évoquent dans ce cas particulier une inspiration égyptienne, comme dans la représentation du lévrier, et dans d'autres une influence syro-mésopotamienne, comme dans le cas des scènes d'acrobatie (Gernez 2007 ; 192). Les manches sont parfois insérés dans des douilles de feuilles en alliages d'or ou d'argent. Ces éléments sont partiellement ou complètement introduits dans le collet où une partie reste visible par l'intermédiaire des fenestrelles. Leur décoration témoigne d'un travail maîtrisé d'orfèvrerie, où plusieurs techniques comme le filigrane et le travail en repoussé ont été appliquées.

En ce qui concerne la production de ces haches, peu de témoins persistent. Trois éléments de moules en pierre ont été trouvés à Byblos hors contexte (Dunand, 1950, Dunand, 1954, Gernez, 2007) et un à Ebla dans une tombe datée entre 1850 et 1750 av. J.-C. donc du début du Bronze Moyen II (Festuccia, 2000). Des moules en pierre ont été également découverts à Hama et à Ras Shamra (Philip 1989 ; 53).

Les six haches fenestrées larges étudiées ici (Fig. 8) proviennent de Byblos. Les haches 11655, 11656 et 11658 appartiennent au dépôt ϵ (Dunand, 1954 ; 219-220). Les haches 10998 et 11708 ont été trouvées respectivement dans les dépôts χ et \omicron et la hache 6320 dans le carré 14/21, levée VII.

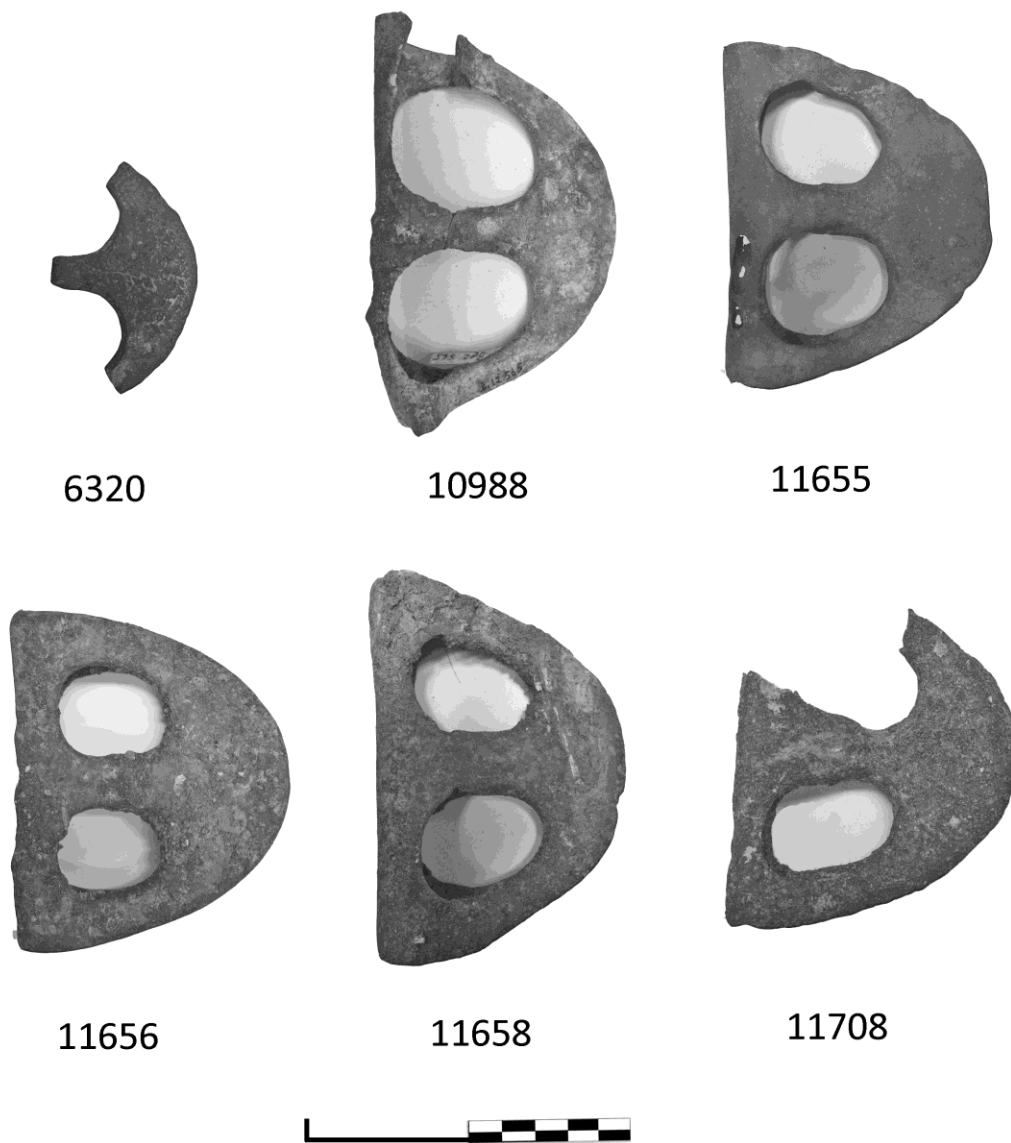


Figure 8: Les haches fenestrées larges de Byblos.

1.3.1.2- Les haches fenestrées étroites

Ces haches sont attestées dans des contextes du Bronze Moyen I (c. 2000-1800 BC), elles sont désignées en anglais par « Duckbill axe ». Elles sont essentiellement concentrées dans la région du Levant, mais leur champ de répartition s'étend jusqu'à Karaköy sur le côté Européen du Bosphore, à Kültepe (Özguç, 1986) et Acemhöyük (Philip 1989 ; 286) en Anatolie centrale, à Tell ed-Dab'a en Egypte (Philip 2006 ; 33), et Kirkuk (Müller-Karpe, 2004 ; 21) en Mésopotamie centrale. Ce sous-type est attesté dans des dépôts d'offrandes et surtout dans des tombes dites de « guerriers » où ces haches sont associées à une ou deux lances et un poignard.

Ces haches en alliage cuivreux diffèrent des haches fenestrées larges par leur fonctionnalité et leur équilibre. Elles sont généralement plus lourdes (Gernez, 2007 ; 190, 195) avec un corps allongé où le poids est concentré au niveau de la lame. Celle-ci possède une forme rectangulaire ou trapézoïdale et une section elliptique ou losangique. Cette morphologie correspond à une arme de choc plus que de taille. Les fenestrelles sont généralement ovales, avec des dimensions qui varient selon la hache. La décoration, lorsqu'elle est présente, consiste en des rainures et des filets entre les fenestrelles et sur le milieu de la lame. Les manches en bois peuvent être plaqués, du moins pour la partie qui pénètre le collet, de feuilles de métaux précieux comme l'atteste un exemplaire provenant d'Arqa (Gernez, 2010).

Comme pour le sous-type précédent, les moules retrouvés associés à cette production sont rares. Ils proviennent de Byblos (Dunand, 1937; pl. 108, 1950 ; pl. 184), de Ras-Shamra (Philip, 1989 ; 49) et d'Arqa (Gernez, 2007). Un atelier de bronziers découvert au niveau Karum II à Kültepe en a livré deux exemplaires (Özgüç 1986, 2003).

Neuf spécimens de Byblos, un d'Arqa et un de Yanouh ont été sélectionnés pour cette étude (Fig. 9). Les haches 6270, 6271, 6272, et 6273 ont été découvertes dans le dépôt σ , la hache 6281 dans le dépôt α (Dunand 1954). Les haches 8349 et 9076 proviennent de la tombe n°3 de Byblos (Montet, 1928). La hache 8350, découverte lors du dégagement de la levée VII dans le carré 9/11 (Dunand, 1954), était associée à un lot de haches plates. Le contexte exact de la hache 10794 est inconnu, mais elle a été retrouvée au Musée Nationale de Beyrouth avec le matériel archéologique de Byblos. La hache 26759 a été découverte dans une tombe de « guerrier » à Arqa (Thalman, 2006 ; 44-45) et la hache 77096 provient de Yanouh du même type de contexte (Monchambert *et al.*, 2010).

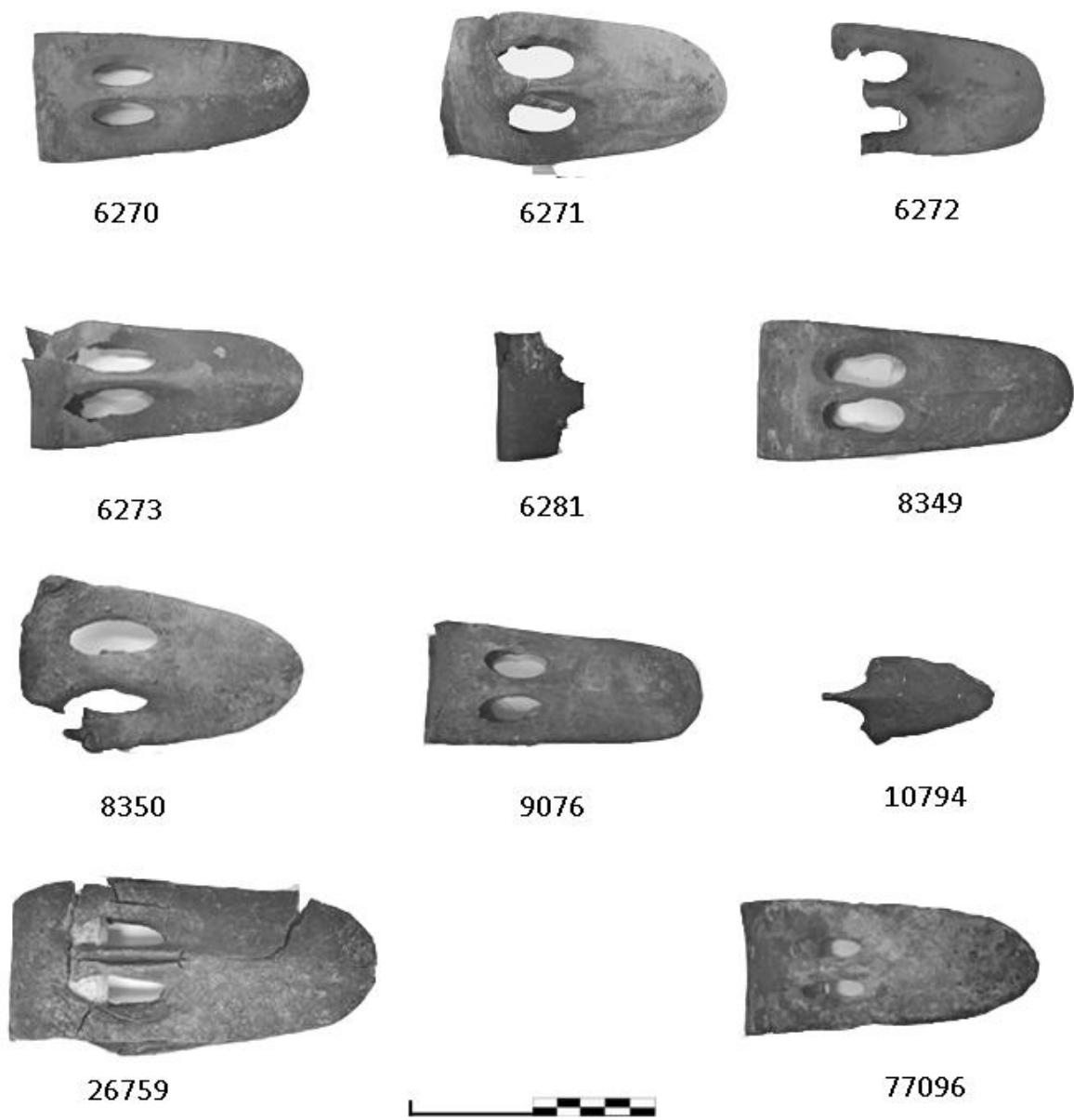


Figure 9: Les haches fenestrées étroites provenant de Byblos, Arqa et Yanouh, faisant partie de cette étude.

1.3.2.-Les pointes de lances à douille

Les pointes de lances à douille se sont largement diffusées dans diverses régions du Proche et du Moyen Orient vers la fin du III^e millénaire, tout en remplaçant progressivement les pointes de lances à soie. Pourtant ce mode d'emmanchement était déjà utilisé pour des harpons et des pics d'Ur au milieu du III^e millénaire. Jusqu'à présent, il reste beaucoup de doute sur l'endroit et la date d'invention de cette lance. Cette arme est attestée au Bronze Moyen I (c.2000-1800 av. J.-C.) au Levant, en Mésopotamie, en Arabie Orientale ainsi que dans quelques sites en Iran, à Kültepe en Turquie, et dans le delta du Nil.

Au moins 417 exemplaires ont été recensés jusqu'à présent dont 73 proviennent de Byblos. A la différence de l'emmanchement à soie, la douille forme une enveloppe métallique autour d'une partie de la hampe assurant une meilleure consolidation du manche en bois. D'après un modèle proposé par J. Kunkel, la mise en forme de la douille serait faite à partir de l'aplatissement d'une partie de l'ébauche de la pointe de lance. Cette partie devrait être martelée pour former une plaque rectangulaire qui est ensuite repliée pour donner la forme de la douille (Kunkel, 1994). Bien que ce modèle ait été proposé en se basant sur des exemplaires d'Asimah (Emirats Arabes Unis), Gernez l'a adopté et l'a appliqué à la quasi-totalité des armes de ce type d'où l'appellation « lance à douille repliée » (Gernez 2007). La douille formée par moulage est considérée très rare, et Gernez (2007 ; 349) conteste l'hypothèse admettant l'utilisation de cette technique de mise en forme. Il considère qu'il est fort probable que la corrosion ait induit les archéologues (Schaeffer, 1949 ; p. 63, Dever, 1975 ; p. 32) à de mauvaises interprétations. Philip propose une autre technique de mise en forme en se basant sur une pièce de moule trouvée à Tell ed-Dab'a (Philip 1989, 2006, Bietak 1985). La lame, et la partie de la douille qui y est en directe connexion avec la zone proximale, auraient été formées par moulage, tandis que les autres zones de la douille étaient moulées en ébauche plate et ensuite martelées pour donner la forme de la douille. De ce fait, dans les typologies de Gernez et de Philip, il n'y a pas de distinction typologique basée sur la technologie, hormis le « Type 10 » des pointes de lances à douille proposé par ce dernier. Il est supposé que les douilles des pointes de lances du « Type 10 » ont été entièrement martelées à plat, puis repliées pour former la douille.

Les typologies de Gernez et de Philip sont basées en premier lieu sur la longueur de la pointe de lance et ils distinguent entre les pointes de lances à douille plus grandes que 35 cm, désignées ici sous le nom de « pointes de lances à douille longues », celles qui sont entre 35 cm et 20 cm, désignées sous le nom de « pointes de lances à douille moyennes », et celles qui sont plus petites que 20 cm, que nous appelons « pointes de lances à douille

courtes ». La distinction entre les trois tailles de pointes de lances reflète aussi une distinction fonctionnelle : les pointes de lances longues ont probablement été utilisées comme armes d'haste et les pointes de lances courtes comme armes de jet. La définition de la fonction des pointes de lances moyennes est problématique ; une distinction claire entre les pointes de lances moyennes et les deux autres sous-types n'est pas possible pour l'ensemble de toutes les lances à douille retrouvées du fait de la continuité des dimensions (Gernez, 2007 ; 350). Potts (1998) propose une détermination de la fonction des pointes de lances par leurs poids. Il se base sur des normes mentionnées, pour des pointes de lances, dans des textes d'Ebla datant du milieu du III^e millénaire (Waetzoldt 1990). Philip (1989) et Gernez (2007) se basent sur la forme et les dimensions de la lame pour affiner leurs distinctions typologiques du fait qu'ils considèrent que la forme de la douille ne varie pas ou très peu. Ainsi Gernez distingue trois variantes qui correspondent à la longueur totale de l'arme et treize sous-variantes selon les critères liés à la lame. De même, Philip en combinant tous ces critères a établi treize « Types ». Dans cette étude seuls les « Types », les variantes et les sous-variantes des objets étudiés seront mentionnés.

1.3.2.1- Les pointes de lances à douille longues

Dans cette étude, dix pointes de lances longues de Byblos (9028, 10268, 10336, 11856, 11913, 11914, 11921, 27855, 27856, 27884) provenant des dépôts du Champ des Offrandes (β , γ , ι et λ) et une d'Arqa (27656) découverte dans la tombe de «guerrier» ont été étudiées (Fig. 10). Celles de Byblos correspondent toutes au type L. 5 A. a. de Gernez (2007 ; 351-352) et au « Type 2 » des pointes de lances à douille de Philip (1989 ; 89). Elles ont une lame étroite présentant une nervure centrale arrondie et large donnant ainsi à la lame un caractère massif. La plupart des exemplaires complets de Byblos présentent une douille au moins 1.5 fois plus longue que la lame. Celle-ci est généralement décorée par deux rainures d'une part et d'autre de la nervure. Aux vingt-neuf exemplaires de Byblos, Gernez ajoute une pointe de lance provenant d'Anatolie du nord (Bilgi 2001, d'après Gernez, 2007 ; 351) provenant d'un contexte douteux et une douille issue d'un hypogée d'Assur (Müller-Karpe 2004). La plupart des pointes de lances longues de Byblos ont été découvertes dans le Champ des Offrandes et le temple aux Obélisques, ce qui permet ainsi de considérer qu'elles appartiennent au début du II^e millénaire av. J.-C. (Gernez, 2007 ; 352, Philip, 1989 ; 89). D'après Philip (1989 ; 89), ces pointes de lances représentent les premières phases de développement de cette techniques d'emmanchement où la fabrication de douille longue relève d'une nécessité technique plutôt que d'un choix délibéré ; l'argument de cet auteur repose sur la persistance de l'utilisation des pointes de lances à soie tout au long du Bronze Moyen I, ce qui constituerait une preuve que les

artisans de l'époque ne possédaient pas les capacités techniques pour développer une douille courte capable de supporter une lame massive. Gernez, quant à lui, propose que l'utilisation d'une douille longue soit liée au fonctionnement de l'arme ; les pointes de lances longues étaient fixées sur des hampes longues qui permettent de maintenir l'ennemi à distance.

La pointe de lance longue d'Arqa correspond au type L 5 A. b de Gernez (2007 ; 352) et ne correspond à aucun « Type » de Philip. La lame de cette arme est large, à épaules convexes, et sa nervure arrondie est fine. La douille est légèrement moins longue que la lame. La tombe de « guerrier », dans laquelle elle a été retrouvée, appartient au Niveau 14 du site et ainsi au début du Bronze Moyen I (Thalmann, 2006 ; 33-35). La contemporanéité des pointes de lances de Byblos et d'Arqa montre que les artisans de l'époque, et contrairement à l'hypothèse de Philip (voir-au-dessus) qui ne disposait pas de ces éléments du corpus au moment où il a publié son étude, fabriquaient des douilles courtes capables de supporter une large lame. Gernez (2007 ; 252) propose une hypothèse plus plausible : « il faut donc supposer que c'est la très grande longueur de la hampe qui explique celle de la douille. Il est possible d'imaginer une arme conçue pour maintenir l'ennemi à bonne distance ». Ainsi, la douille longue aurait été utilisée probablement pour consolider la partie distale de la hampe. Le type L 5 A. b. de Gernez renferme trois pointes de lances en plus de celle d'Arqa. Une d'entre elles provient de la tombe G IV de la phase H (BA IV/ BM I) de Hama (Fugmann, 1958) et les deux autres de la tombe A1 A4 d'Asimah qui sont postérieures à la fin du III^e millénaire BC (Gernez, 2007 ; 352).

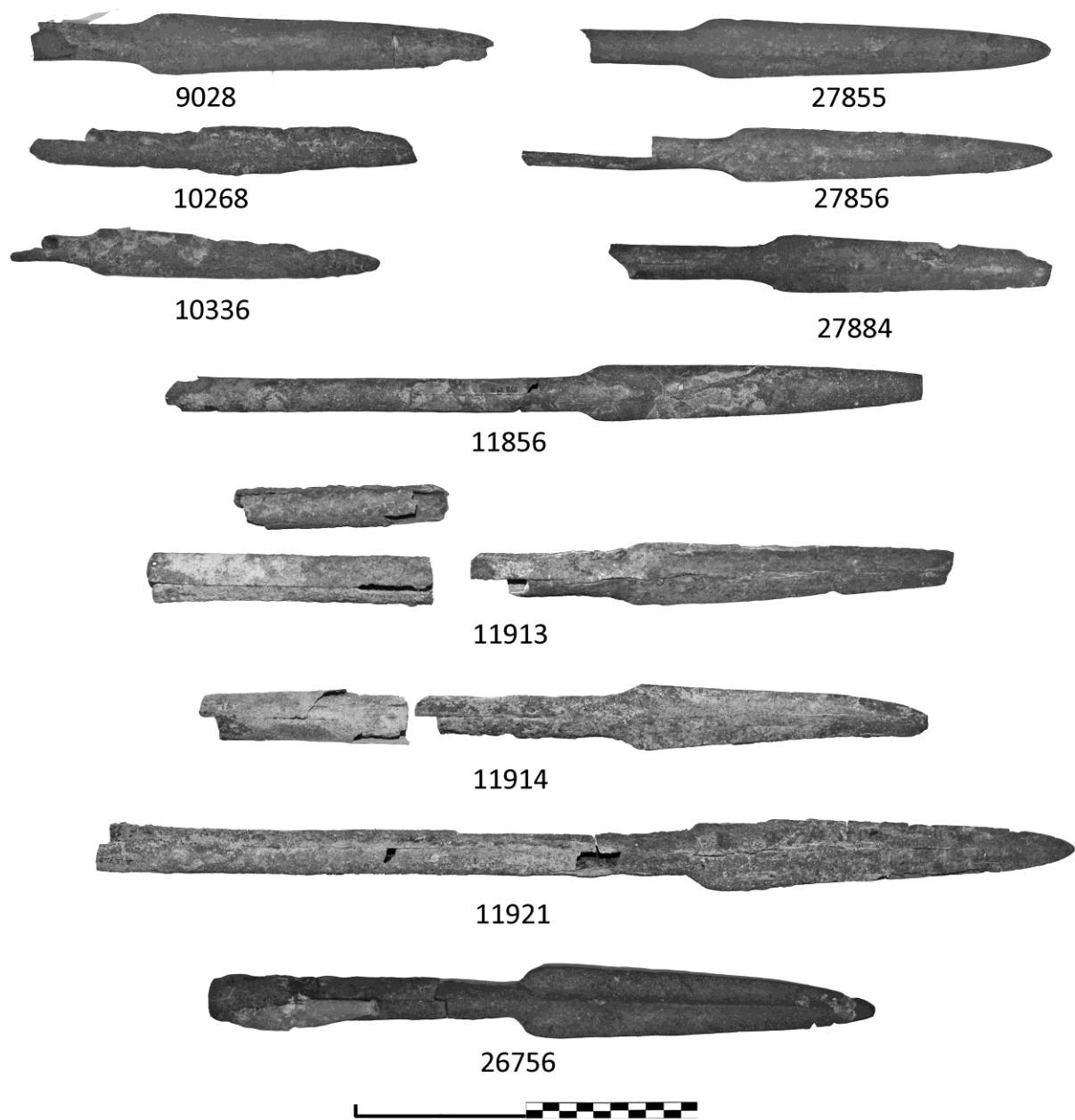


Figure 10 : Les pointes de lances à douille longues provenant de Byblos et Arqa faisant partie de cette étude (11856, 11913, 11914 et 11921, clichés de G. Gernez).

1.3.2.2- Les pointes de lances à douille moyennes

L'arme 10978 (Fig. 11) découverte dans le dépôt χ du Champ des Offrandes à Byblos constitue le seul exemplaire appartenant avec certitude aux pointes de lances à douille moyennes datant du Bronze Moyen I. Elle correspond au type L. 5 B. b1 de Gernez (2007 ; 355) et au « Type 4 » de Philip (1989 ; 91). Elle présente une lame large à nervure centrale fine et aux épaules droites. Elle est décorée d'une ou deux rainures, de part et d'autre de la nervure. La douille est légèrement plus courte que la lame. Selon la typologie de Gernez, le type L. 5 B. b1 renferme dix pointes de lances découvertes dans les dépôts χ et π du Champ des Offrandes et dans le dépôt du mur nord du Temple aux Obélisques à Byblos, datant du Bronze Moyen I, ainsi que deux exemplaires d'Ugarit considérés par Schaeffer (1949 ; 50) comme appartenant à l'Ugarit Moyen (2100-1900 BC). Le « Type 4 » de Philip comprend, en plus des armes de Byblos, une pointes de lances d'Ebla (Matthiae, 1980) et deux autres de tombes de Tell-et-Tin, site localisé dans la vallée de l'Oronte en Syrie (Gautier, 1895 ; 456-459, Philip 1989 ; 359). Toutes ces pointes de lances appartiennent au Bronze Moyen I, bien que selon Philip (1989 ; 91) le « Type 4 » pourrait avoir persisté durant le Bronze Moyen II.

La longueur (216 mm) de la pointe de lance 10870 (Fig. 11), située à la limite inférieure de la taille des pointes de lances moyennes, peut poser un problème de distinction avec des pointes de lances courtes comme celle n° 11200 (197 mm) de Byblos. Cependant, le poids relativement élevé du n° 10870 (200 g) par rapport à l'exemplaire 11200 (54 g) constitue, à notre avis, un critère suffisamment discriminant qui permet de considérer cette pointe de lance comme étant de la catégorie moyenne. La morphologie particulière de cette arme massive est caractérisée par une lame large présentant une nervure centrale assez basse ainsi que des épaules et une pointe de lame arrondies.

La pointe de lance 77137 (Fig. 11), découverte dans le Niveau 2 du Sondage 2 du site de Yanouh (Monchambert *et al.*, 2010), pourrait appartenir aux pointes de lances à douille moyennes. La longueur conservée de sa lame (133 mm) montre qu'elle n'appartient pas aux pointes de lances courtes. Les dimensions de la partie de la douille en contact direct avec la lame (16 mm x 11 mm) pourraient constituer un argument jouant en faveur de sa classification comme pointe de lance courte. Cependant, l'état détérioré de cette arme ne permet pas de confirmer si effectivement elle appartient à cette classe de pointes de lances ou à la classe plus grande.



Figure 11: Les pointes de lances à douille moyennes provenant de Byblos et de Yanouh faisant partie de cette étude.

1.3.2.3- Les pointes de lances à douille courtes

Quatorze pointes de lances (10274, 10277, 10279, 10280, 10301, 10303, 10322, 10325, 10810, 10976, 10977, 10982, 10997⁵, 11200) provenant de Byblos ont été étudiées (Fig. 12). Hormis l'exemplaire 10810, trouvé dans la démolition des murs compris entre les levées XI et XX, toutes les autres pointes de lances à douille courtes appartiennent aux dépôts d'offrandes (β , γ , χ et ζ). Deux autres armes (56066, 56064) provenant de la tombe 2 du site de Khariji ont été ajoutées à ce corpus (Fig. 12). Généralement, ces armes présentent des lames et des douilles de dimensions proches, bien que pour certaines, telles 11200 et 10279, la douille est considérablement plus longue que la lame. Les variations dans la forme de la lame constituent le marqueur principal utilisé pour la distinction typologique.

⁵ Gernez classe cette arme avec les pointes de lances à douille moyenne L 5.B.a2. Cependant au vue de sa longueur totale et de la longueur de sa lame nous avons préféré de la classer avec les pointes de lances à douille courtes.

Selon la typologie de Gernez, les pointes de lances 10280, 10301, 10325, 10810, 10976, 10977, 10982, 10997 et 56066 appartiennent au type L 5 C. a. constitué d'une lame de forme triangulaire avec une section losangique ou à forte nervure centrale. A ces pointes de lances peut s'ajouter l'exemplaire n° 11200 qui présente une lame similaire au n° 10325 mais possède une douille qui est à peu près 1.5 fois plus longue que la lame. Bien que quelques exemplaires du type L 5 C. a. ont été trouvés dans des contextes relevant du Bronze Ancien IV, comme à Ugarit, Ur et Suse, la plupart de ces armes appartiennent au Bronze Moyen I sur une zone comprenant l'Anatolie, le Levant, la Mésopotamie, le Delta du Nil, le sud de l'Iran actuel et l'Arabie Orientale (Gernez, 2007 ; 358). Cependant ces observations pourraient être erronées du fait de leurs contextes archéologiques peu variables ; la plupart des ces armes, au Levant et en Mésopotamie, a été trouvée dans des tombes de « guerriers » caractéristiques du Bronze Moyen I et II. Les armes 10277 et 10322 et 10279, possédant une douille 2 fois plus longue que la lame, appartiennent au type L 5 C. b. 1 constitué de pointes de lances à douille courtes disposant d'une lame « ogivale ». Dans les exemplaires étudiés ici la nervure centrale est très peu marquée. Le type L 5 C. b. 1 apparait surtout au Levant dans des contextes datant du Bronze Moyen I et du début du Bronze Moyen II (Gernez, 2007 ; 360). La pointe de lance courte 56064 correspond au type L 5 C. d. qui est beaucoup plus rare que les deux premières sous-variantes. Deux exemplaires de dimensions proches ont été trouvés à Ginnosar en Galilée (Epstein, 1974 ; 31) et deux autres de dimensions correspondant aux pointes de lances à douille moyennes ont été découvertes à Ruweisé à côté de l'actuelle ville de Saida au Liban (Guigues, 1937). Elles ont été retrouvées dans des contextes archéologiques qui pourraient dater du Bronze Moyen I (Epstein, 1974).

Philip (1989) propose une autre classification typologique, selon les formes et les dimensions de ces armes, mais parvient aux mêmes conclusions sur la répartition géographique et chronologique que Gernez. Selon Philip (1989 ; 361), la pointe de lance 10277 appartient au « Type 6 » qui représente des longueurs qui distinguent clairement les pointes de lances à douille moyennes des courtes. Ces armes ont été trouvées dans des contextes datant du Bronze Moyen I et probablement du début du Bronze Moyen II comme à Baghouz (Philip 1989 ; 93, du Mesnil du Buisson, 1948). Les armes 10976, 10977, 10982 et 10977 pourraient correspondre au « Type 8 », caractérisé par des lames larges aux épaules angulaires et une nervure étroite, bien qu'à la différence des pointes de lances de ce Type celles étudiées ici présentent une nervure centrale assez marquée. Ce « Type » est surtout rencontré dans des contextes du Bronze Moyen I et possiblement du Bronze Moyen II. Les pointes de lances 10280, 10324 et 11200 correspondent au « Type 9 », possédant des traits assez proches du « Type 8 », mais présentant des lames moins larges. Bien que le n° 11200 présente une longueur totale assez proche de celle du n° 10277, l'auteur a préféré les classer en deux Types différents. Ce choix est probablement basé sur les dimensions de la

lame de l'exemplaire 10277 qui sont visiblement plus importantes que celles de la lame d'un° 11200. Finalement, les pointes de lances 10274, 10279, 10301 et 10303 correspondent au « Type 10 » qui, selon Philip (1989 ; 96), se distingue du type de toutes les autres pointes de lances par leur technique de mise en forme de la douille. Les plus anciens exemplaires de ce « Type » ont été trouvés à Khirbet Iskandar (Richard, 2006) et à Megiddo (Prag, 1973 ; 93, d'après Philip 1989 ; 97) dans des contextes appartenant à la fin du III^e millénaire. Des exemplaires de ces pointes de lances ont été trouvés en Anatolie comme à Kültepe en Syrie (Özgüç, 1950), à Barbar au Bahrain (Høljund, 2003 ; 259) à Tell Yelkhi et à Kirkuk en Mésopotamie (Müller-Karpe, 2004 ; 22, 87).

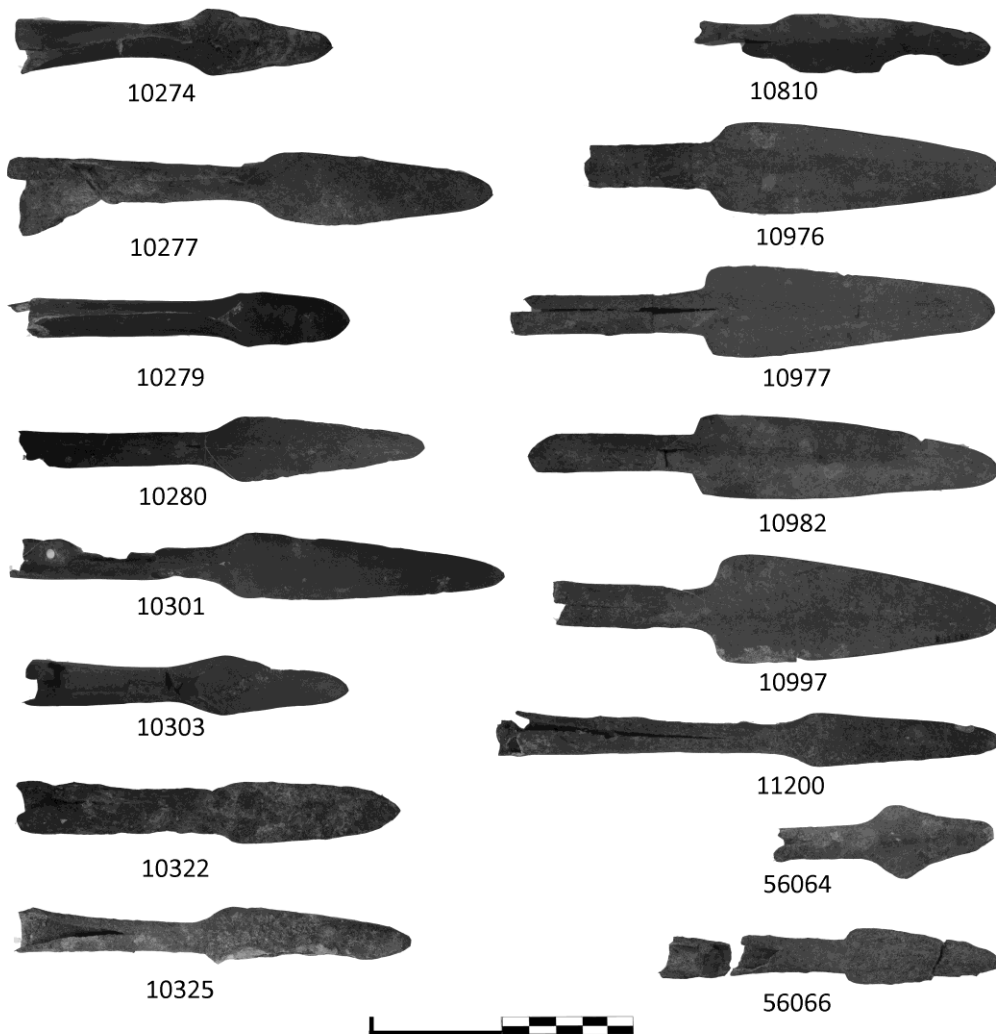


Figure 12 : Les pointes de lances à douille courtes provenant de Byblos et de Khariji faisant partie de cette étude.

1.3.3-Les pointes de lances à languette rivetée

Ces pointes de lances à languette pourraient être fixées sur une hampe par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs rivets. La similarité de la technique d'emmanchement avec celle des poignards et des épées rend la distinction entre ces armes difficiles (Amiran, 1961 ; 92, Dever, 1971 ; 36). Cependant, Eisenberg (1985 ; 65), Philip (1989 ; 83) et Gernez (2007 ; 371) s'accordent à différencier ces pointes de lances des autres armes par leurs dimensions. Dans cette étude nous avons remarqué une différence nette entre les épaisseurs des pointes de lances à languette rivetée qui sont généralement plus importantes que celle de l'ensemble des poignards ayant des longueurs similaires (annexe 1 : T.a. 3 et 4). Une autre distinction, proposée par Eisenberg (1985) suite à ses études sur les tombes de 'Enan, se base sur la position de l'arme par rapport au défunt. Généralement les poignards sont positionnés au niveau de la taille de l'individu, par contre les pointes de lances, plus massives, se trouvent dans une dépression de la tombe présentant suffisamment d'espace pour la pointe de lance et sa hampe.

Ces pointes de lances ont été retrouvées dans des contextes datant du Bronze Ancien IV au nord de la Palestine comme à 'Enan (Eisenberg, 1985) et Ma'ayan Barukh (Amiran, 1961) ainsi qu'à Byblos dans les dépôts d'offrandes du Bronze Moyen I (Dunand, 1954). Dever (1971) attribue trois exemplaires, présumés avoir été découvertes dans des tombes du Bronze Ancien IV et du Bronze Moyen I au village de Sinjil, au Bronze Ancien IV. D'après l'auteur, cette datation est basé sur la ressemblance de ces exemplaires à ceux de Ma'ayan Barukh. Un exemplaire trouvé dans une tombe d'Assur date aussi de la fin du III^e millénaire (Müller-Karpe, 2004 ; 8). D'après Gernez (2007 ; 372), le choix d'un classement typologique basé sur la forme de la languette, le nombre et la disposition des rivets, est arbitraire du fait de la fréquence de ces variations sur les pointes de lances dans le même dépôt d'offrandes. Ainsi il n'est pas possible de dégager une distinction culturelle ou chronologique en se basant sur ce type de classement. Philip ne fait aucune distinction entre les différentes variations de forme des ces armes et les considère comme un seul « Type ». Dans cette étude nous considérons toutes les pointes de lances à languette rivetée comme un seul ensemble. Notre travail porte sur onze de ces armes (9031, 9046, 9050, 9051, 10334, 11102, 11109, 11110, 12320, 12329, 12332) (Fig. 13) provenant des dépôts d'offrandes de Byblos (γ , κ , υ et ϵ).

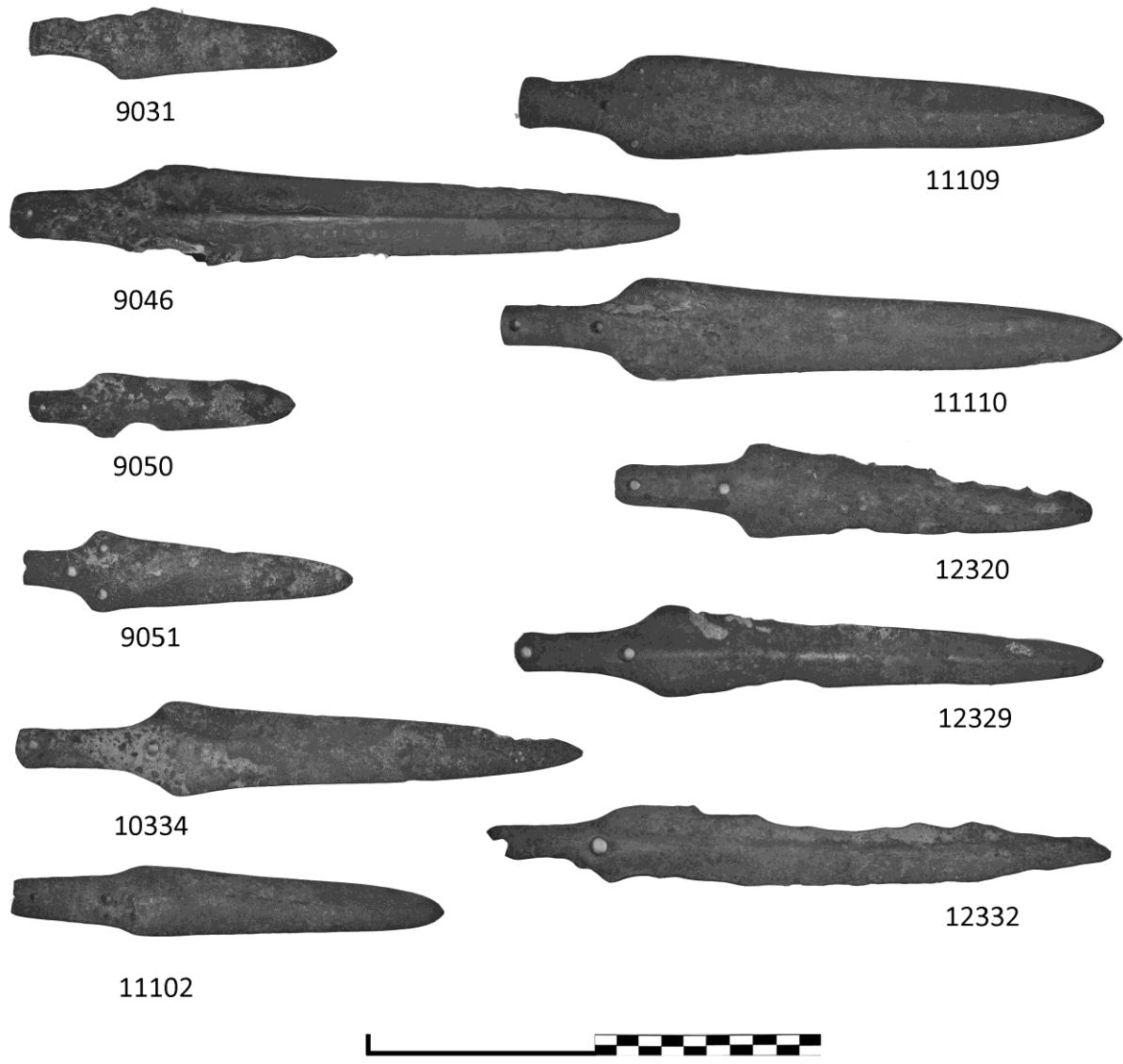


Figure 13: Les pointes de lances à languette.

1.3.4-Les poignards

Les poignards ont été utilisés au Levant à partir de la fin du Chalcolithique (Dunand, 1939) ou du début du Bronze Ancien (Shalev, 1994). Définis par Philip comme étant une arme ayant une lame pointue à deux tranchants, ils sont généralement fixés au manche par l'intermédiaire d'une soie, d'une languette ou d'un talon. Ces deux derniers types d'emmanchement peuvent comporter un ou plusieurs rivets. Les poignards peuvent avoir plusieurs formes de lame (triangulaire, ogivale, biconcave et biconvexe) qui peuvent présenter une ou plusieurs nervures, des rainures et des filets. Cette variabilité de formes a conduit les différents chercheurs qui ont traité ce sujet à proposer un nombre important de classification : Maxwell-Hyslop (1946) propose cinquante six types ; Philip, quarante « Types » et Gernez a défini 11 types divisés en 40 sous-types sans compter les variantes et les sous-variantes.

Notre corpus comprend quinze poignards de Byblos (9021, 10293, 10309, 10811, 10831, 11661, 11671, 11686, 11697, 11854, 11930, 27857, 27871, 27883, 27902), un d'Arqa (26757) et un autre de Khariji (56062). Ils seront présentés selon les types définis par Gernez (2007), ensuite les sous-types et les variantes seront comparés avec les « Types » proposés par Philip.

1.3.4.1- Les poignards simples à languettes

Comme leur nom l'indique, ces poignards présentent une lame de forme simple et une languette. Gernez a déterminé neuf sous-types, selon le nombre et la disposition des rivets ainsi que des variantes et des sous-variantes en se basant sur la forme de la lame en plan et en section. Dans cette étude, quatre poignards simples à languette (11661, 11686, 11697, 56062) ont été étudiés (Fig. 14). Le poignard 11697 est un poignard à rivet et à lame biconvexe. Il peut donc correspondre au type P. 2 B. d. de Gernez (2007 ; 458) qui comporte seulement un exemplaire de Shimal au Yemen de la période Wadi Suq et un autre de Chypre attribué au 20^e ou 19^e siècle av. J.-C. Cependant, le nombre de rivets mis à part, la forme de cette arme est très similaire à celle des exemplaires 11661 et 11686. Ces deux armes, correspondant au type P 2 G. d. 3, présentent trois rivets disposés en V et une lame biconcave. Selon Gernez (2007 ; 468), ces poignards apparaissent au Levant au Bronze Ancien III, IV et au Bronze Moyen I. Le poignard de Khariji (56062) peut aussi appartenir au type P 2, mais l'état de sa languette ne permet pas de déterminer le nombre de rivets qu'il aurait pu posséder. Les poignards 11697 et 11661 peuvent être assimilés au type « broad-bladed daggers » de Philip (1989 ; 130) considéré par cet auteur comme caractéristique du

Bronze Moyen au Levant et particulièrement en Syrie et au Liban, en contraste avec les « narrow-bladed daggers » de Palestine. L'arme 11661 peut correspondre au « Type 32 » qui apparait au Levant vers la fin du III^e millénaire et continue d'être en usage jusqu'à la fin du Bronze Moyen. Cependant, et comme dans le cas précédent, l'attribution du n° 11697 au « Type 32 », bien que sa forme soit compatible, reste contradictoire avec la description de ce « Type » de fait du nombre de rivets. Peut-être faut-il considérer ce poignard comme un cas particulier où le nombre de rivets ne doit pas être pris en compte dans son attribution à un classement typologique. Le poignard 11686 correspond aussi par la forme générale et le nombre de rivets au « Type 32 », mais il est attribué au « Type 16 » par Philip (1989 ; 444) qui englobe une grande variété de poignards à lame décorée. La plupart des exemplaires du « Type 16 » a été trouvée dans des contextes du Bronze Moyen I à Byblos. A ceux-ci s'ajoute un exemplaire de Gezer (Philip 1989 ; 119).



Figure 14 : Les poignards simples à languette.

1.3.4.2- Les poignards simples à talon

Les poignards 10293, 11671, 11854 et 27857 (Fig. 15) correspondent à ce type. Ils présentent tous trois rivets disposés en V et peuvent donc être assimilés au sous-type P 3 E. de Gernez (2007 ; 477) et au « Type 30 » de Philip (1989 ; 131) désigné aussi comme « broad-bladed daggers ». Cette forme simple de poignard est attestée au Levant depuis le IV^e millénaire comme dans les tombes énéolithiques de Byblos et Tell Judaidah dans l'Amuq. Gernez considère que ce type de poignard se diffuse en Syrie intérieure durant le Bronze Ancien II, pour se répandre sur tout le Levant durant le Bronze Ancien IV. Les exemplaires du Bronze Moyen I sont rares sauf à Byblos. L'étendue géographique de la répartition de ces poignards comprend des sites dans les Balkans, en Mésopotamie, en Arabie Orientale, à Chypre et Anatolie (Gernez 2007 ; 478). Philip (1989 ; 132) dissocie son « Type 30 » des poignards de Tell Judaidah et de ceux de la nécropole énéolithique de Byblos, et considère ainsi que les premiers poignards de ce Type sont ceux découverts en Syrie intérieure dans des contextes datant du début du III^e millénaire.



Figure 15: Les poignards simples à talon.

1.3.4.3- Les poignards à sillon ou double sillon médian

Gernez définit ces objets comme étant des poignards caractérisés par la présence d'un sillon, ou rainure, simple ou double sur la nervure centrale. La lame est souvent biconcave et la partie d'emmanchement peut consister en une languette ou un talon présentant trois ou quatre rivets disposés respectivement en V ou en Y. Jusqu'à présent, seul Byblos a livré ce type de poignards dans des contextes du Bronze Ancien IV (Dunand, 1954 ; 165) et dans les dépôts d'offrandes datant du Bronze Moyen I. Les exemplaires 11930 et 27092 (Fig. 16) appartenant à ce type et découverts dans les dépôts d'offrandes β et ζ ont été inclus dans notre corpus. Philip n'a pas assimilé ces poignards à un type particulier mais il est possible d'attribuer ces poignards au « Type 16 » du fait de l'hétérogénéité des exemplaires décorés qu'il renferme et de la compatibilité géographique et chronologique avec le type P 6-7 de Gernez.



Figure 16: Les poignards à double sillon médian.

1.3.4.4- Les Poignard à double nervure

Ces armes se caractérisent par deux nervures bien marquées qui sont souvent séparées par une rainure ou un filet. La lame est généralement large et de forme triangulaire. La partie d'emmanchement peut être une languette ou un talon avec deux rivets placés sur une ligne perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'arme ou trois rivets disposés en V. Un des exemplaire de Byblos, découvert dans le dépôt aux ors, semble être en métal précieux et possède une poignée revêtue d'une plaque, elle aussi en métal précieux, présentant d'un côté une scène animalière et de l'autre une divinité (Dunand, 1958 ; 696).

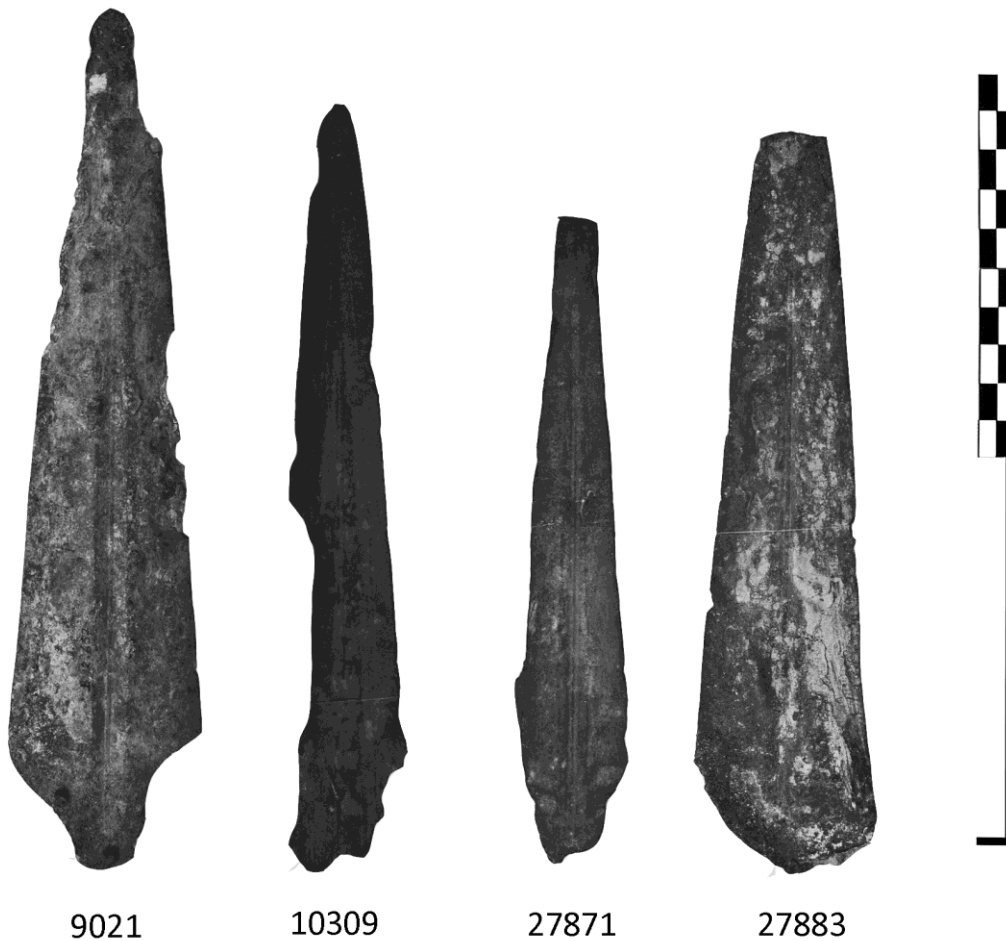


Figure 17: Les poignards à double nervure.

Quatre exemplaires (9021, 10309, 27871 et 27883) de ce type ont été étudiés (Fig. 17). Ils proviennent des dépôts d'offrandes β et λ. Ces armes correspondent au sous-type P 7 B. de Gernez (2007 ; 498) présentant un filet médian et une rainure longitudinale ou deux rainures du côté extérieur de chaque nervure. A part un exemplaire découvert à Ebla, dans un contexte datant du début du Bronze Ancien IV (Matthiae, 1985 ; fig. 136), la plupart des exemplaires proviennent de contextes appartenant au Bronze Moyen I. Une grande partie de ces poignards a été trouvée à Byblos. Quelques exemplaires proviennent de Sin el-Fil au Liban, Tell et-Tin (Philip 1989 ; 435) située dans la vallée de l'Oronte à l'Ouest de Homs, à Ras-Shamra (Schaeffer, 1978 ; 511) et à Kültepe (Özgüç, 1959 ; 59). Les quatre poignards étudiés ici correspondent également au « Type 12 » de Philip (1989 ; 115-116). Selon cet auteur la répartition géographique de ce Type s'étend sur la Syrie, le Liban et le nord de la Palestine. Tous les exemplaires du Type « 12 » ont été découverts dans des contextes appartenant au Bronze Moyen I.

1.3.4.5- Les poignards à lame bombée et à filets ou sillons/rainures multiples

Les armes (Fig. 18) correspondant à ce type et faisant partie de cette étude proviennent de Byblos (10811, 10831) et d'Arqa (26757). Le poignard 26757, découvert dans une tombe de « guerrier », présente une lame décorée par cinq filets longitudinaux et un talon disposant de trois rivets en V. La garde de cette arme est décorée par une feuille en métal blanc non-ferreux. Ce poignard correspond au sous-type P 8 A. a. de Gernez (2007 ; 501-502). Selon cet auteur le type P 8 A. a. présente une répartition géographique assez restreinte qui s'étend d'Arqa au nord du Liban jusqu'à Tell ed-Daba'a sur le Delta du Nil. Les contextes archéologiques ayant livré ce sous-type ont amené Gernez à proposer une durée d'utilisation qui s'étend du début du Bronze Moyen I jusqu'au début du Bronze Moyen II.

Le poignard 10811 possède une lame décorée par alternance de rainures et de filets longitudinaux qui se rejoignent avant la pointe. Il présente une languette rectangulaire percée d'un trou de rivet. La lame comporte deux trous de rivet sur sa base conférant ainsi au système d'emmanchement des rivets disposés en V. Ces éléments nous laissent supposer que ce poignard correspond au sous-type P 8 C de Gernez (2007 ; 504) qui date probablement du Bronze Ancien IV. La plupart des exemplaires provient de tombes de sites Nord Levantin comme Jerablus Tehtani (Peltenburg *et al.*, 1995), Umm el-Marra (Schwartz *et al.*, 2003) et Tell Bi'a (Strommenger, Kohlmeyer, 1998). A Byblos le n° 10811 est le seul exemplaire susceptible d'être attribué à une période précise. Il provient de la salle C du Bâtiment II (Dunand, 1939 ; 261) et pourrait donc appartenir à la fin du III^e millénaire. Le poignard 10831 présente une lame large décorée par cinq rainures profondes et larges. Il

correspond au sous-type P 8 D. b. de Gernez (2007 ; 505) dont les exemplaires datent du Bronze Moyen I et proviennent de Ras shamra (Schaeffer, 1962 ; 232), Byblos et possiblement de Chypre (Catling, 1964).

Selon la typologie de Philip (1989 ; 117-118) les poignards 10811 et 26757 pourront être attribués au « Type 13 » qui combine en quelque sorte les caractéristiques des sous-types P 8 A et P 8 C. Ainsi Philip, en se basant sur la datation des tombes de Tell el-‘Ajjul et de Tell el-Daba’a propose que ces poignards datent du Bronze Moyen I et possiblement du début du Bronze Moyen II. Selon Philip, sur le site de Byblos ces poignards auraient été utilisés légèrement après la « clôture » des dépôts d’offrandes. Il base son argumentation sur le fait de l’absence du « Type 13 », assez « fréquent » en Palestine, de ces dépôts. Il constate alors qu’à l’époque de la déposition des armes dans les dépôts cette forme de poignards n’était pas adoptée à Byblos. Philip attribue le poignard 10831 à son « Type 15 », qui est formé de poignards à lame large et décorée mais qui ne sont pas compatibles avec ses « Types 12 », « 13 » et « 14 ». Tous les exemplaires de ce « Type » datent du Bronze Moyen I. Ils ont été retrouvés dans une zone qui s’étend d’Amarna au nord de la Syrie jusqu’à Tell el-‘Ajjul au sud de la Palestine (Philip, 1989 ; 119).



Figure 18: Les poignards à lame bombés et à filets ou sillons/rainures multiples.

Chapitre 4

Ateliers et artisans

1.4.1- Organisation du travail des artisans des alliages cuivreux au Proche Orient

Les données concernant l'organisation du travail et de l'atelier du bronzier Levantin, durant la période du Bronze Moyen, sont restreintes à de rares informations disponibles à partir de textes cunéiformes, de représentations graphiques et de données archéologiques... Les informations sur les bronziers étant rares, des données concernant plusieurs types d'artisans seront mentionnées tout en gardant à l'esprit que l'organisation de ces pratiques peut varier selon de la région, la période et le type d'artisanat.

D'après Costin (1991), une distinction peut se faire entre le ou les artisans « libres », qui contrôlent le choix et la redistribution de leurs produits, et les artisans rattachés à des institutions, comme celles d'un temple ou d'un palais. Dans ce cas, le choix du type de production et la redistribution des produits sont contrôlés en amont par des élites. Ces deux cas représentent les deux opposés dans l'organisation possible du « métier » des artisans et plusieurs situations intermédiaires peuvent exister. Nous présentons ici des données portant sur les ateliers du Bronze Ancien IV et du Bronze Moyen I.

D'après Wright(1998) les sources sumériennes permettent de distinguer plusieurs catégories ou statuts d'artisans en Mésopotamie durant la troisième dynastie d'Ur, soit 2112-2004 av. J.-C. selon la chronologie moyenne. Les '*Erin₂*' étaient des artisans qui travaillaient pendant une partie de l'année pour les institutions de l'état. En contre partie de leur travail, ils recevaient des rations de produits de subsistance, comme de l'orge, ainsi qu'une parcelle de terre pour laquelle ils avaient un droit d'exploitation permanente. Cependant, ce terrain restait toujours la propriété de l'état. D'après des textes de la ville d'Umma en basse Mésopotamie, cette catégorie concernait surtout les travailleurs du bois. Ils réalisaient à la fois le travail d'un forestier et d'un charpentier. De plus, ils pouvaient être recrutés dans l'armée. Steinkeller (1996) argumente l'idée que les potiers devaient travailler à mi temps pour l'état (6 mois par an ou 15 jours par mois), après cette période, ils étaient libres de travailler pour eux-mêmes ; l'organisation de l'alternance nous reste inconnue.

Les 'UN-*il*' travaillaient à temps plein pour l'état contre des rations alimentaires. A la différence des deux premières catégories, '*Geme*' est une catégorie constituée de femmes qui travaillent les tissus. Cependant, comme les 'UN- *il*' elles travaillaient en permanence pour le palais ou le temple mais recevaient des quantités moins importantes de ration alimentaires. Selon quelques auteurs, '*Guruš*' semble être un terme utilisé pour désigner des artisans qui travaillent à temps partiel pour l'état (Postgate, 1992). Selon d'autres, cette catégorie consiste en des artisans non-libres travaillant pour des institutions politiques ou des élites et dont le statut est équivalent à celui des esclaves (Diakonoff, 1974). Il semble qu'une grande partie des différents groupes d'artisans était centrée autour d'un noyau familial comme dans le cas des potiers et des forestiers d'Umma (Steinkeller, 1996 ; Wright, 1998). La fonction d'un atelier semble avoir diversifiée ; elle pouvait porter sur la fabrication d'un seul type d'objet ou le travail d'un matériau particulier, sur certaines phases du processus de fabrication, ou bien encore comporter plusieurs types d'artisanat pour la fabrication d'objets comportant plusieurs matériaux (Van de Mierop, 1987). Bien que ces sources Sumériennes aient livrées la plus grande quantité des informations permettant l'étude des artisans, elles restent spécifiques à une époque caractérisée par une organisation administrative particulière (Yoffee, 1995) et qui concerne exclusivement la Mésopotamie. Aucune généralisation, dans l'espace ni dans le temps ne doit donc, a priori, être faite sans précautions.

Les travaux de Stone (1990) et Stone et Zimansky (1992) à Mashkan-Shapir, ville située en basse Mésopotamie, sur les niveaux archéologiques attribués au premier quart du 2^e millénaire ont permis de proposer quelques hypothèses concernant l'organisation de l'artisanat des alliages cuivreux. Selon ces archéologues, l'analyse spatiale de la répartition des déchets du travail d'alliages cuivreux (comme les scories) permet de mettre en évidence la concentration d'un certain nombre de petits ateliers de bronziers dans un quartier principal proche du centre du site. Ce quartier qualifié par E. Stone (2005) comme l'équivalent d'un « Main Street », serait alors un quartier principal de la ville où se concentrent le petit commerce et des ateliers privés.

Les archives royales de Mari mentionnent seulement les activités artisanales liées au Palais. Ainsi au 18^e siècle av. J.-C. les artisans produisaient pour le roi de nombreux objets en métaux précieux et en alliages cuivreux. Ces documents révèlent une certaine structuration au sein d'un atelier dirigé par des chefs d'équipes ou maîtres-artisans qui doivent répondre aux exigences du roi par l'intermédiaire d'un administrateur du roi (Margueron et Pfirsch, 2005 ; 170, Durand 1997 ; 221). Dans certains cas, les artisans se sont adressés directement au roi pour expliquer des difficultés techniques ou pour concevoir la quantité nécessaire de métaux pour la fabrication d'une œuvre (Durand, 1997 ; 229). D'ailleurs, il semble que les métaux destinés à être utilisés dans la fabrication étaient

fournis par le roi. Cependant, ces archives ne permettent pas de déterminer si les bronziers et les orfèvres dépendaient complètement ou non du palais (Durand, 1997 ; 170). De surcroît, les fouilles de Mari n'ont mis en évidence aucune activité métallurgique à l'intérieur de l'enceinte du palais (Margueron et Pfrish, 2005 ; 171, Margueron, 2004 ; 94, 108, 109).

Comme dans le cas de Mari, les archives royales d'Ebla, datant du milieu du troisième millénaire av. J.-C., documentent les activités artisanales liées aux palais et à l'élite (Archi, 1982). Ces documents montrent que de grandes quantités de métal étaient disponibles dans cette ville et que les élites s'en servaient, en partie, pour la fabrication d'objets de prestige destinés à être utilisés comme paiement, comme cadeau ou comme dons aux temples (Milano, 1995). Wattenmaker (1998) considère que les inventaires de métal, les quantités de matières premières et d'objet en métal fournis par le palais aux orfèvres et aux bronziers montrent que ces artisans étaient administrés, au moins partiellement, par cette institution. Cette administration se manifeste aussi dans d'autres domaines artisanaux où les archives livrent des indications sur les rations distribuées par l'état aux tisserands ou encore les inventaires des ressources de subsistance dans la « maison des charpentiers » (Archi, 1982 ; 216). Cependant, en contraste avec ce contrôle, les archives d'Ebla semblent indiquer que les ateliers étaient localisés à la périphérie, voire à l'extérieur de la ville (Archi, 1982 ; 209, 212). Ceci va à l'encontre de l'hypothèse de Costin (1991) où l'artisanat spécialisé administré par l'élite devrait être proche du centre de leur pouvoir par souci de mieux contrôler la production.

Le site de Kültepe, ancienne ville de Kanish, situé en Anatolie centrale a livré les informations les plus pertinentes sur la localisation et l'activité des ateliers des artisans des alliages cuivreux durant le premier quart du deuxième millénaire av. J.-C. Les documents ont été découverts dans le *Kârûm*, qui dans ce cas peut être défini comme un comptoir commercial, où des marchands venus d'Aššur en Mésopotamie du nord échangeaient leur étain et leurs tissus contre de l'or et de l'argent local (Margueron et Pfrisch, 2005 ; 169). Ces marchands étaient installés dans la partie Nord du *karûm* qui dépendait des autorités assyriennes (Michel, 2000 ; 79). Dans le niveau *karûm II* (20^e-19^e siècles av. J.-C.) des ateliers ont été trouvés dans une zone à caractère artisanal, au sud du *karûm*, qui correspond à la zone des résidents indigènes (Özüç, 1986 ; 43). Les moules en pierre découverts dans ces ateliers montrent que le ou les artisans produisaient plusieurs types d'objets comme des armes et des parures, dont certains, comme les haches fenestrées, étaient destinés à une clientèle assyrienne (Özüç, 1986 ; 46). Dans le niveau *Karûm Ib* (18^e siècle) des ateliers ont été trouvés dans les quartiers résidentiels. Ils étaient ouverts sur une rue ou sur une cour et produisaient, comme durant la période précédente, divers types d'objets. Au vu de l'emplacement des ces ateliers dans un comptoir de marchands étrangers, de leur grand

nombre, de leur localisation dans un quartier résidentiel, nous pouvons supposer qu'il s'agissait d'établissements privés qui réalisaient des commandes pour les habitants du *Karûm* ou qui vendaient eux même leurs produits sur le marché.

D'après Scheel (1989 ; 59, 60), il n'y avait pas d'artisanat du métal indépendant en Egypte. Les artisans travaillaient en équipe dans des ateliers rattachés au temple, au palais ou même à des membres de l'élite. Ces équipes étaient constituées d'artisans spécialistes et d'une main-d'œuvre non spécialisée. Elles étaient dirigées ou contrôlées par des chefs d'ateliers et des inspecteurs, qui eux devaient répondre du travail devant un responsable de rang élevé (Valbelle, 1992 ; 59, Scheel, 1989 ; 59). De plus, il existait des artisans « royaux » qui selon Scheel ne dépendaient pas des ateliers du temple ou du palais, mais directement du roi (voir aussi Valbelle, 1992 ; 56-58). Ceux-ci avaient un statut meilleur que le reste des artisans et pouvaient être envoyés par le roi pour réaliser des œuvres pour des particuliers. Le paiement durant la 12^e dynastie se faisait par des rations de produits alimentaires comme la bière et le pain (Valbelle, 1992 ; 59). Plusieurs preuves semblent confirmer les hypothèses de Scheel concernant le statut de l'artisan : la découverte d'un atelier de bronziers dans le temple de Sêti I daté, par la céramique, de l'époque ptolémaïque. Le dégagement d'un grand centre de travail d'alliages cuivreux (surface de 3 ha) à Qantir à l'est du Delta du Nil (Ogden 2009). Celui-ci aurait fonctionné vers la fin de la 18^e et le début de la 19^e dynastie (14^e et 13^e siècle). Les scènes de travail du métal dans les tombes d'élites, comme celle du vizir *Mereruka* et du vizir *Pepiankh* datant de la 6^e dynastie (24^e-22^e siècles) et celle du vizir *Rekh-Mi-Re* de la 18^e dynastie (15^e siècle). Les papyrus de *Reisner* qui décrivent la gestion des travaux et des artisans sur trois chantiers de construction et un atelier de réparation des outils d'un chantier naval royal (Valbelle, 1992 ; 58). Cependant, la plupart des informations qui nous est parvenue ne provient que de contextes liés aux élites où les activités privées des artisans sont rarement décrites. Selon Eyre (1998), plusieurs indices, comme les représentations pariétales d'*Unas*⁶ (fin de la 5^e dynastie) et les documents du village des artisans à Deir el-Medina, montrent qu'il n'est pas invraisemblable que des artisans travaillant, au moins partiellement, pour leur propre compte aient pu exister. Selon Menu (2004 ; 206) les artisans de Deir El-Medina échangeaient entre eux plusieurs commodités comme des vaisselles en cuivre et en bronze. En plus, bien qu'au Moyen et Nouvel Empire l'état fournissait les outils aux artisans, ces derniers possédaient aussi leurs propres instruments avec lesquels ils se font enterrer. Ceci montre que des objets en cuivre ou en alliages cuivreux circulaient dans le secteur privé

⁶ Les reliefs du complexe funéraire d'*Unas* datant de la fin de la 5^e dynastie, représentent des artisans qui vendent leurs produits finis dans un marché (Eyre, 1998).

entre la plupart des classes sociales et que tous les échanges et la production de ces objets ne dépendaient pas nécessairement de l'élite.

Les cas mentionnés dans ce paragraphe semblent indiquer qu'au Proche Orient lorsque l'état était bien structuré, l'artisanat du métal était rattaché à des institutions comme le palais ou le temple ou à des membres de l'élite. Dans le cas où l'influence ou le pouvoir de l'état était réduit, comme dans le cas du *Karûm* de Kanish, les artisans travaillaient pour leur propre compte. Cependant, les données récoltées sur les artisans dans chaque ville proviennent généralement d'une seule source d'information. D'une part, la plupart des données obtenues sur les artisans de Mari et d'Ebla provient des archives royales. Ces sources décrivent des faits qui s'inscrivent dans un cadre d'élites et ne portent pas directement sur la vie de l'artisan. Elles ne constituent donc en aucun cas la preuve que l'artisan n'avait pas des activités privées, d'autant plus qu'aucun atelier de bronziers n'a été trouvé dans l'enceinte des palais de ces deux villes. D'autre part, à Kanish et à Mashkan-shapir, les informations obtenues sur les artisans travaillant dans le secteur « privé » proviennent uniquement de vestiges d'ateliers en milieu résidentiel et donc ne permettent pas de caractériser les relations entre les artisans et les élites. Ainsi, les modèles d'organisation du travail des bronziers sur chacun de ces sites sont probablement incomplets et possiblement biaisés par les données, obtenues le plus souvent à partir d'une seule source d'information, ceci ne permet pas d'avoir une vision générale englobant les rapports des différentes classes sociales en rapport avec cet artisanat.

1.4.2- Les vestiges de la métallurgie de transformation de Tell Arqa et de Byblos

1.4.2.1- Tell Arqa

Ce site a livré des moules en deux pièces ou à pièces multiples fabriqués en pierre tendre (Gernez, 2010, 2008). Aucun de ces moules n'est associé à un contexte d'atelier de métallurgistes. Ils étaient utilisés pour fabriquer des armes, des parures et possiblement des figurines. Trois fragments de moules d'armes ont été identifiés. Il s'agit d'un fragment d'une pièce d'un moule de hache fenestrée étroite (Fig. 19) et deux fragments de moules de poignards à lame décorée (Fig.19). D'après Gernez (2010), ces trois fragments sont réalisés en chlorite. Ils présentent plusieurs trous de fixation utilisés pour joindre les différentes pièces constituant chaque moule. Sur les fragments du moule de poignards nous distinguons aussi des événements situés d'un seul côté de l'empreinte de la lame. Les blocs de roche présentent des empreintes gravés sur plusieurs faces, témoignant ainsi d'une volonté d'utilisation intensive de la pierre. Ces moules ont été datés du Bronze Moyen I à partir de

la typologie des armes qu'ils pourraient produire. Un autre fragment d'une pièce de moules en chlorite (Gernez, 2010), provenant d'un contexte incertain, présente les empreintes de deux épingles ou d'une figurine.

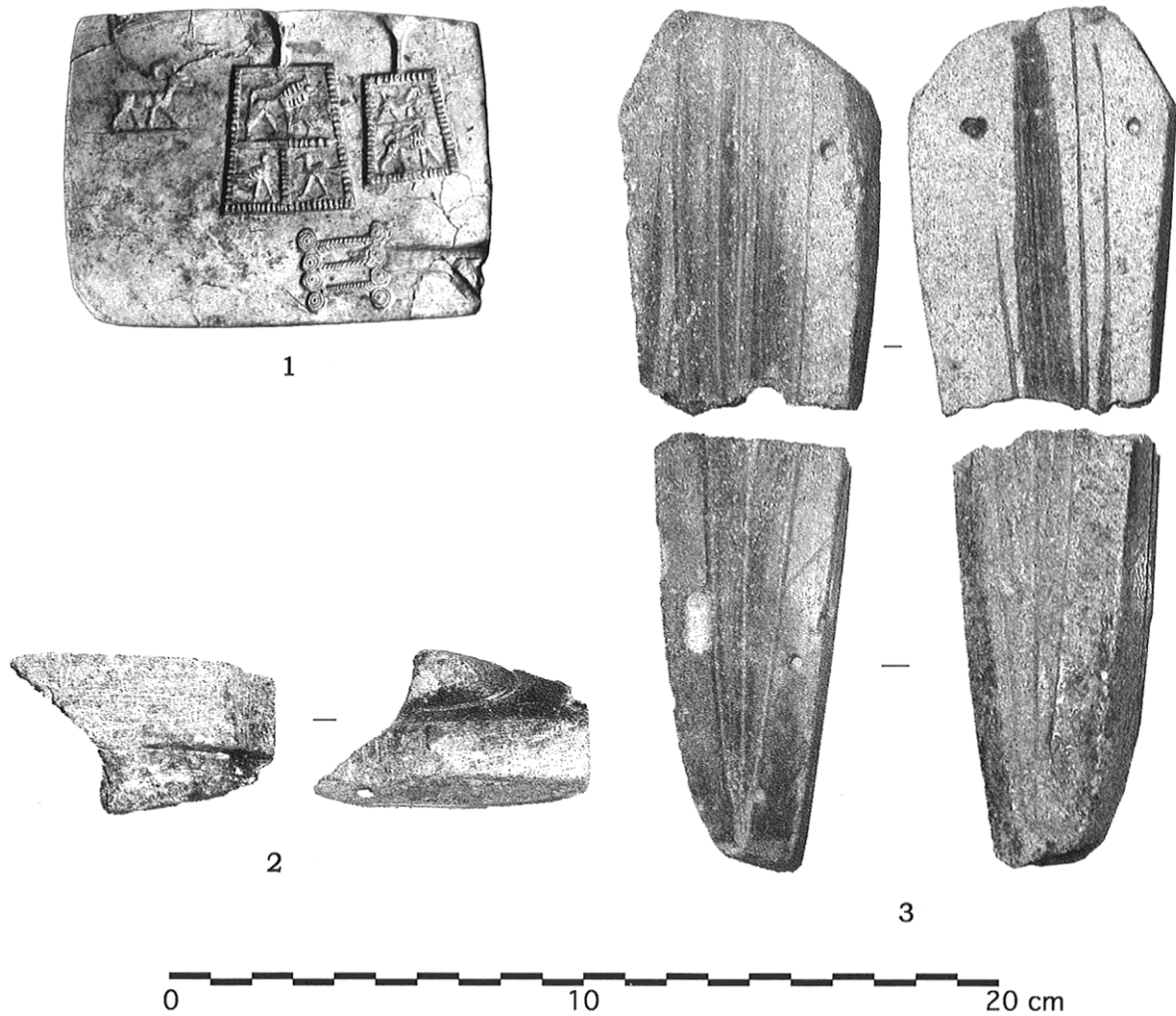


Figure 19: trois moules retrouvés à Arqa. 1- moule de « bijoux » en calcaire ; 2- fragment de moule de hache fenestrée étroite ; 3- deux fragment d'un moule de poignard à lame décorée (d'après Gernez, 2010).

Une pièce complète d'un moule, présumé être en calcaire (Gernez, 2010, 2008), comporte plusieurs matrices de « bijoux »⁷ (Fig. 19). Le contexte archéologique dans lequel

⁷ Selon Gernez (2008), il ne faut pas exclure la possibilité que les objets produits soient des éléments décoratifs appliqués sur un support en bois.

cet objet a été trouvé est attribué à la deuxième moitié du Bronze Ancien IV (2200-2000 av. J.-C.). Trois des matrices gravées sur le bloc présentent des entonnoirs de coulée. Une quatrième représentant une empreinte d'un bouc en est dépourvue. Elle pourrait servir, comme les autres matrices aussi, pour coulée du plomb ou des alliages précieux. Cette pièce de moule ne contient pas de trous de fixation, ni de rainure qui pourrait servir à maintenir un fil de serrage. Généralement ces éléments de fixation sont présents afin d'assujettir les deux pièces du moule présentant chacune une empreinte. L'absence d'un système permettant de fixer avec précision les deux pièces entraîne vers l'hypothèse que la pièce manquante du moule est dépourvue d'empreinte. Tous ces indices, ajoutés au fait que le dos de la pièce du moule trouvée est bombé, nous laisse supposer que le mode d'utilisation de ce moule consistait à poser sa face sur une dalle en pierre ou en terre cuite dans une position inclinée. Au vu de l'absence d'évents, cette position aurait facilité l'évacuation des gaz.

1.4.2.2- Byblos

Plusieurs objets pouvant servir lors de la mise en forme des objets en alliages cuivreux sont mentionnés dans les publications de Dunand (1937, 1939, 1950, 1954, 1958). Cependant, comme dans le cas de la plupart des objets trouvés sur ce site, ils sont difficilement datables à cause de la méthode de fouilles adoptée. L'archéologue a identifié plusieurs pièces en pierre comme étant des aiguiseurs, des affûtoirs ou des polissoirs (Dunand, 1937 ; pl. 110, 1950 ; pl. 84, 1954 ; 380, 455, 483, 516, 547 ; fig. 577). Il ne donne pas d'argument pour justifier ses identifications. De surcroît, aucune étude de tracéologie n'a été effectuée sur ces pièces.

Dunand semble avoir reconnu des tuyères dans plusieurs pièces coniques en terre cuite (Dunand, 1954 ; 456, 564 ; fig. 480, 641, 1958 ; 911, 960 ; fig. 1067). Elles présentent une longueur qui varie entre 4 et 9 cm et un diamètre externe maximal de 2 à 5 cm. Cependant, il ne mentionne aucune trace de chauffe qui pourrait aider à confirmer le rôle de ces objets.

Les moules constituent un témoignage fiable de l'activité métallurgique à Byblos. La plupart des moules mentionnés dans les publications de Byblos (1939, 1954, 1958) sont en pierre, identifiée par l'archéologue comme étant de la stéatite ou du grès. Au moins 48 pièces ou fragments de moules ont été trouvés sur ce site. Ils étaient utilisés pour produire des parures, des figurines, des outils, des armes et des objets non identifiés (Dunand, 1937 ; pl. 106, 107, 108, 1950 ; pl. 183, 184).



Figure 20: moule de perle de Byblos (contexte non déterminé) présentant un trou de fixation et un entonnoir de coulée sur une face, et une rainure pour maintenir en place un fil de serrage.

Une partie de ces moules peut être datée grâce aux empreintes des objets qu'ils comportent. Les moules des armes par exemple témoignent d'une activité de fonderie qui a duré au moins du Bronze Ancien III, si nous nous fions à la datation d'un moule de hache en epsilon à languette repliée (Gernez, 2007 ; 179, Dunand 1937 ; pl. 108), jusqu'à la deuxième moitié du Bronze Moyen I, comme l'atteste un moule de hache à collet et lame étroite à encoche (Gernez, 2007 ; 137, Dunand, 1950 ; pl. 184). Certaines pièces présentent plusieurs empreintes sur une ou plusieurs faces (Dunand, 1937 ; pl. 108, 1950 ; pl. 183, 184). La plupart des moules supposés être en stéatite ont été utilisés pour produire des parures, des figurines ou des armes. La plupart présentent des trous de fixation. Sur les quelques exemplaires, que nous avons pu examiner, nous avons remarqué la présence, sur la face dépourvue d'empreinte, de rainures pour maintenir en place des liens de serrage (Fig. 20). Les événements sont rarement présents sur les plans de joints des moules ; nous n'en avons trouvé que sur une pièce de moule de hache fenestrée large (1950 ; 184). Les moules dits en grès sont généralement réservés à la coulée d'objets plats comme les outils. L'absence de trou de fixation et d'entonnoir de coulée nous mène à supposer qu'ils sont constitués de deux pièces contenant l'empreinte et d'une autre qui est plate. Celle-ci sert uniquement de couvercle pour empêcher la formation d'une peau rugueuse due à l'oxydation de la surface, et au retrait, du métal en cours de solidification. De ce fait nous supposons également que cette pièce comporte aussi l'entonnoir de coulée.

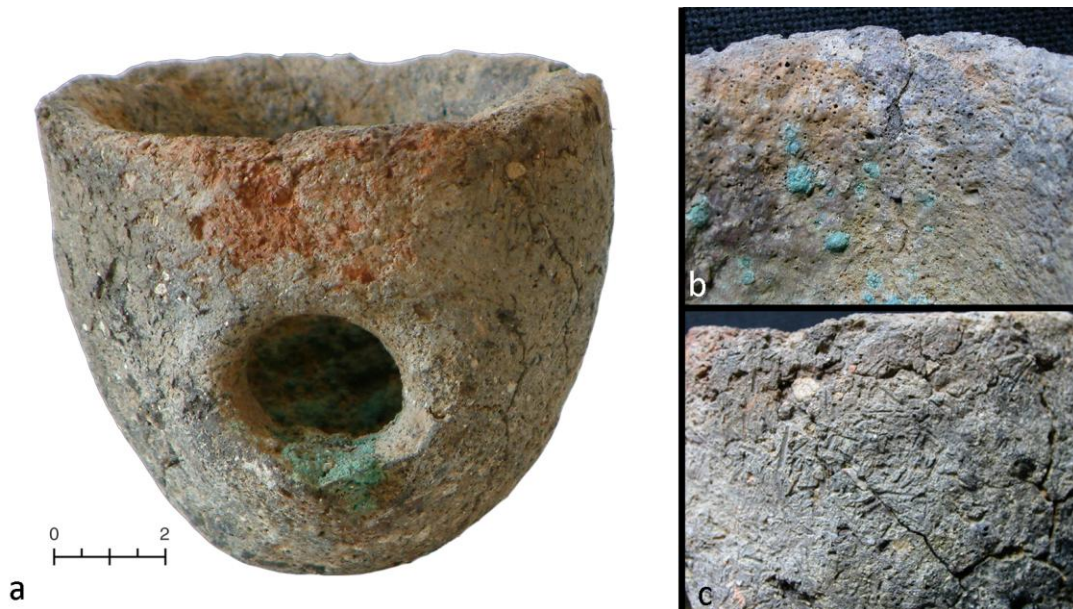


Figure 21: a-creuset (Dunand, 1958 ; 847) présentant un trou de coulée ; b-paroi intérieure vitrifiée et présentant des restes d'alliages cuivreux oxydés ; c- paroi extérieure présentant des empreintes de pailles utilisées comme dégraissant et consommées durant le chauffage du creuset (clichés de A. Seif).

Un creuset (Dunand, 1950 ; pl. 112, 1958 ; 847 ; fig. 962) à été trouvé dans « l'atelier de bijouterie » située dans une chambre annexe au *temple aux obélisques*. Au vu du contexte de sa trouvaille il peut être daté du Bronze Moyen I. Le creuset est de forme hémisphérique (Fig. 21 a) et présente un trou, qui semble avoir servi à la coulée. Son diamètre maximal est de 10.7 cm, sa hauteur de 9.5 cm et l'épaisseur des parois sont aux alentours de 1 cm. Le trou de coulée, présentant un diamètre de 3 cm est situé, à peu près à 3 cm de la base. Un calcul approximatif du volume de la partie inférieure du creuset montre qu'il pourrait contenir environ 0.3 L d'alliage cuivreux liquide. Des restes en alliages cuivreux sont attachés aux parois intérieures vitrifiées (Fig. 21 b) du creuset. Les parois extérieures sont fissurées et légèrement vitrifiées. Elles sont recouvertes d'empreintes de bouts de pailles (< 1 cm) attestant l'utilisation d'un dégraissant organique (Fig. 21 c). De plus, nous avons repéré plusieurs inclusions minérales blanches, généralement plus petites que 1 cm, ainsi il est possible qu'un dégraissant minéral ait aussi été utilisé. Selon Tylecote (1982) l'ajout de dégraissant végétal, ou plus généralement organique, fragilise le creuset mais favorise la création de pores ce qui pourrait réduire le transfert de chaleur. Il est aussi à noter que la porosité améliore très probablement la résistance aux chocs thermiques. Ainsi, une fois que le creuset est sorti du four, une chute rapide de la température pourrait être atténuée. Des creusets, de forme et des dimensions variées, présentant des trous de coulée dans leur panse sont connus dans plusieurs régions du Proche Orient et de la Méditerranée:

les reliefs de tombes en Egypte attestent l'utilisation de ce type de creuset (Scheel, 1989 ; 23-31), au moins dès l'Ancien Empire (5^e et 6^e Dynasties). Davey (1983), a publié deux creusets du Tell edh-Dhiba'i en Irak datés aux alentours de 1800 av. J.-C. En Grèce, à l'île de Kea, des creusets à trou de coulée pouvant contenir jusqu'à 6 kg de métal (2 /3 de litre pour un alliage cuivreux) sont attribués au XII^e siècle av. J.-C. (Tylecote, 1982).

1.4.2.3- la question de "L'atelier de bijouterie"

Très peu de données sont disponibles sur la présence d'ateliers de travail de métal à Byblos. Dunand (1958 ; 651) parle brièvement d'un « atelier de bijouterie » localisé dans une salle carrée (7 m de coté) située en annexe à l'angle nord-est du *temple aux obélisques*. L'archéologue offre peu de détails concernant la description de cette salle. Elle a livrée une pierre cylindrique pourvue d'une large rainure diamétrale que l'archéologue qualifie de table de travail, une jarre contenant des pommeaux de poignards et des os d'animaux et de deux autres jarres contenant des figurines et d'autres objets en bronze. Généralement, la présence de tels objets n'est pas suffisante pour émettre l'hypothèse de l'existence d'un atelier de métallurgistes. Cependant, plusieurs indices vont dans le sens de la proposition de Dunand. En effet certains objets découverts dans cette salle attestent d'une activité métallurgique. Il s'agit du creuset que nous venons de mentionner, de plusieurs feuilles d'or repliées sur elles-mêmes et présentant des traces de découpes, de deux cônes creux en terre cuite qui pourrait être utilisés comme tuyère, de quatre lingots ainsi que d'un grand nombre de figurines en alliages cuivreux, parfois non-finies, et de pommeaux de poignards. De plus, l'analyse de la répartition des moules sur l'ensemble du site (Fig.22) montre que 38 des 70 moules recensés ont été découverts dans une zone de 4700 m² adjacente à cet atelier du côté nord du *temple aux obélisques*. Vingt-deux autres moules sont répartis sur 10400 m² du côté sud du ce temple et entre la *chapelle orientale* et le *champ des offrandes*. Sept moules ont été aussi retrouvés sur une surface de 10 m² dans la ruelle α (Dunand, 1939 ; 425, 426) au nord du site. La majorité de ces moules a été retrouvée entre les levées 2 et 22 (voir partie 1 site de Byblos). Cette répartition ne permet pas d'aboutir à des conclusions pertinentes par rapport à l'histoire de l'activité métallurgique du site. Cependant, la concentration des moules autour de « l'atelier de bijouterie » nous amène à proposer l'hypothèse suivante : à Byblos des activités métallurgiques se déroulaient probablement dans la zone sacrée des temples et plus précisément à proximité ou dans le *temple aux obélisques*. Le travail de métal a bien pu se dérouler partiellement ou entièrement dans « l'atelier de bijouterie ». Cependant, l'absence de structure de chauffe (four, foyer) et de résidus de travail nous mène à envisager la possibilité que cette salle ait été un entrepôt d'objets et d'outils ou/et un atelier d'assemblage d'objets métalliques et

d'application de décorations en métal précieux. Le ou les atelier(s) de mise en forme des objets en alliages cuivreux aurait été à proximité du côté nord ou nord-est de « l'atelier de bijouterie ». La diversité de type d'objets (armes, outils, parures et figurines) qui pourront être produits par les moules retrouvés à côté de « l'atelier de bijouterie » nous mène à envisager deux possibilités :

- 1- La production des objets en alliages cuivreux, leur distribution, et les artisans sont dépendants d'une ou de plusieurs institutions religieuses plutôt qu'à une institution politique comme le palais. Cette configuration d'artisanat dépendant du temple se rapproche alors du modèle d'organisation égyptien.
- 2- L'installation de plusieurs artisans autour des structures religieuses pour vendre des produits qui sont liés aux rites religieux comme les figurines et les armes. La localisation de cet ou de ces ateliers du côté nord et nord-est du *temple aux obélisques* est proche de l'entrée principale de la ville ; ils étaient donc accessibles aux adorateurs venus de l'extérieur. Ces artisans fabriquaient également un large panel d'objets pour subvenir aux besoins des habitants de Byblos. Dans ce cas, les artisans seraient « libres » et travailleraient pour leurs propres comptes.

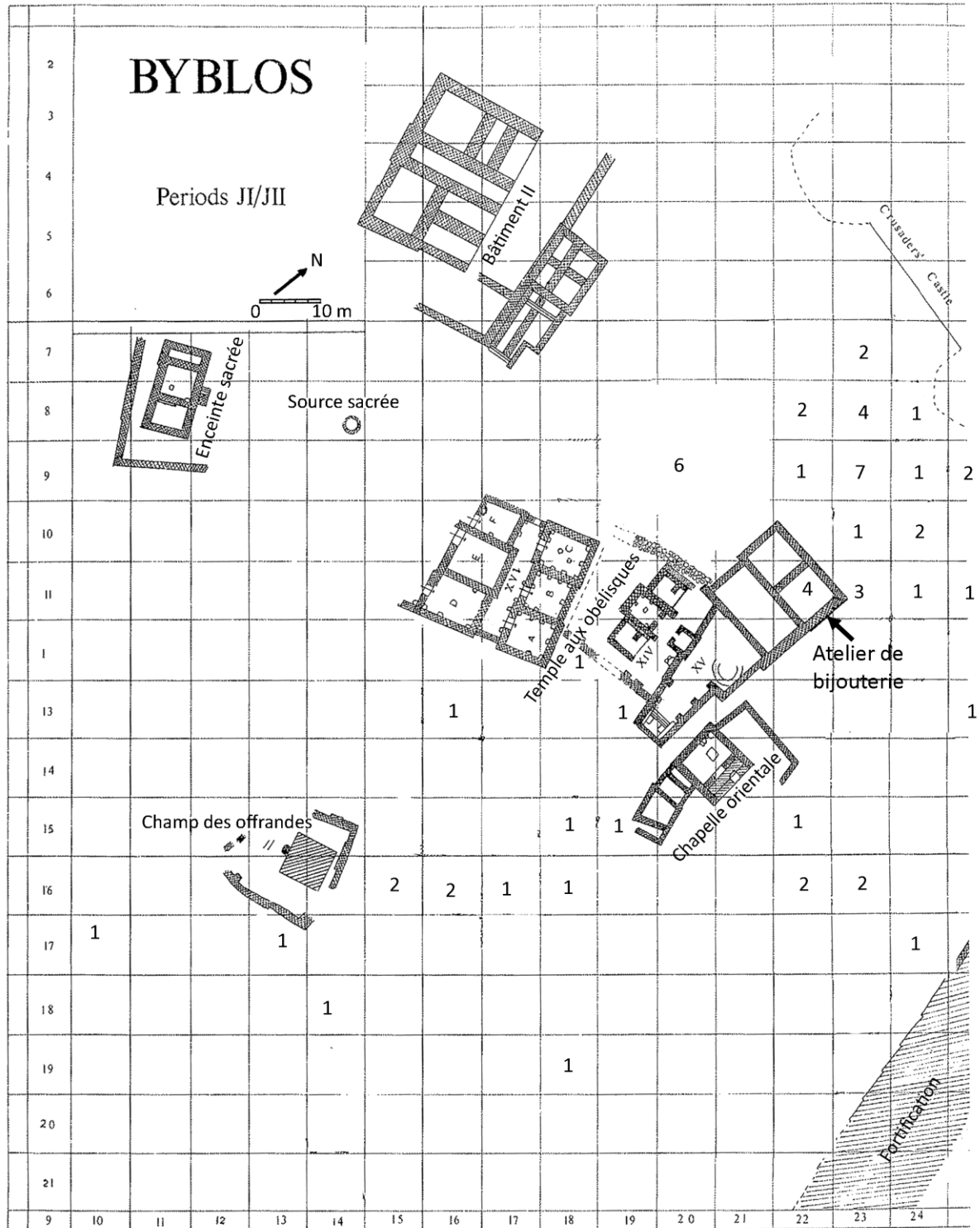


Figure 22: plan du site situant «l'atelier de bijoutier» et présentant le nombre d'éléments de moules par carré. 7 moules retrouvés dans la ruelle α et 3 autres moules provenant des carrés 10/6, 11/9 et 12/9 ne sont pas représentés. Ces moules ont été retrouvés entre la levée 2 et 22.

II - Etude de la métallurgie des alliages cuivreux

Chapitre 1 : Etat de la recherche

Chapitre 2 : Etude de la morphologie des armes

Chapitre 3 : Métallographie

Chapitre 4 : Analyses des isotopes du plomb

Chapitre 1

L'état de la recherche

2.1.1- Synthèse des travaux sur la métallurgie ancienne du Levant du Chalcolithique jusqu'au Bronze Moyen

Depuis les années 1970, la métallurgie des alliages cuivreux anciens de la région du Levant a fait l'objet de plusieurs programmes analytiques. Ces travaux ont visé essentiellement la détermination de la provenance du cuivre, des techniques d'extraction du métal et la composition des alliages. Les techniques de mise en forme et les chaînes opératoires employées par les artisans n'ont été jusqu'à ce jour que rarement abordées. Le plus souvent les chercheurs se contentaient, quand ils disposaient de coupes métallographiques, de décrire sommairement la structure cristalline d'une partie d'un objet sans essayer d'explorer les informations pour retracer le processus de fabrication et les choix des artisans (Branigan, *et al.*, 1976, Shalev, 1988, Stech *et al.*, 1985). Les différentes régions du Levant sont inégalement documentées par les données analytiques. Le chalcolithique et l'Age du Bronze en Palestine et en Transjordanie ont fait l'objet de plusieurs programmes analytiques⁸ menés par des chercheurs comme S. Shalev (1994, 1995) L. Khalil (1984) et H. Hauptmann (2007). Les premiers travaux importants effectués en Syrie (Moorey et Schweizer, 1972) ont porté sur 75 objets découverts dans 11 sites des régions du Khabur et du Sajur datant du début du Bronze Ancien IV (c. 2400 B.C) jusqu'au Bronze Récent (c. 1600-1200 B.C). D'autres programmes analytiques larges ont porté sur des sites du Bronze Ancien situés au nord-est de la Syrie (Northover, 2000, 2001, De Ryck *et al.*, 2005) ainsi que sur des objets du Bronze Ancien, Moyen et Récent du site d'Ebla (Palmieri, Hauptmann, 2000). Au Liban, très peu de données sont disponibles bien que quelques analyses élémentaires et des isotopes du plomb aient été réalisées sur 25 objets provenant de Byblos⁹ (Schaeffer 1949 ; 64) et de Sidon¹⁰ (Le Roux *et al.*, 2009). Ainsi les

⁸ Des analyses élémentaires ont été effectuées sur environ 450 objets (Shalev, 1994).

⁹ Schaeffer (1949 ; 64) ne précise pas quelle méthode a été employée pour déterminer la composition des objets.

différents aspects de la métallurgie de la Palestine et de la Transjordanie sont mieux documentés que dans les cas de la région côtière de la Syrie et du Liban, que ce soit au niveau chronologique ou au niveau du nombre d'objets étudiés.

Les données sur les alliages cuivreux au Levant ont été obtenues principalement par des analyses de spectrométrie d'absorption atomique (AAS), par spectrométrie d'émission optique au plasma (ICP-OES), par microsonde de Castaing (EPMA) et par spectrométrie de fluorescence-X (XRF), bien qu'occasionnellement d'autres méthodes aient été employées. Parmi les quelques 900 objets étudiés, environ 150 ont fait l'objet d'observations et d'analyses élémentaires à partir de coupes métallographiques (EPMA et EDXS). Les coupes métallographiques d'échantillons prélevés sur les objets par sciage, présentent l'avantage de permettre un meilleur contrôle de la zone d'analyse et ainsi d'éviter les zones corrodées de l'objet. Les échantillons prélevés par forage, analysés en AAS, ICP-AES et ICP-MS, offrent moins de possibilités de sélection ; les importantes parties corrodées peuvent être évitées, mais l'incidence de la corrosion dans les joints de grains, ou intra-granulaire, qui peut entraîner un appauvrissement ou un enrichissement de certains éléments majeurs comme l'étain, est moins contrôlée. Dans certains cas, les compositions élémentaires obtenues par AAS sur des objets corrodés, où seulement une sélection fixe de métaux a été dosée, ne représente pas la totalité du pourcentage massique de l'échantillon parce qu'une grande partie des éléments constituant la corrosion n'est pas dosés. De ce fait, les valeurs absolues obtenues par AAS et les valeurs normalisées obtenues par MEB-EDXS sont difficilement comparables lorsque les échantillons sont corrodés. Ce problème lié à la corrosion est encore plus important lorsqu'il s'agit d'analyser la surface altérée d'un objet par des méthodes comme le XRF ou le PIXE (Northover, Rychner, 1998 ; Giunlia-Mair, 2005). Dans ce cas, et bien que les couches de corrosion puissent être en partie nettoyées, le contrôle de l'état de la surface analysée reste assez difficile, surtout dans le cas d'enrichissement ou d'appauvrissement de zones superficielles d'un objet en éléments majeurs comme l'étain ou le plomb. En conséquence, la comparaison d'une partie importante de ces données entre elles ne peut être faite que d'une manière très qualitative.

2.1.1.1- Les 5^e et 4^e millénaires et la première moitié du 3^e millénaire (Chalcolithique, Bronze ancien I, II et III)

Plusieurs travaux (Golden *et al.*, 2001, Hauptmann, 2007, Hauptmann *et al.*, 1999, Levy, Shalev, 1989, Namdar *et al.*, 2004 ; Philip *et al.*, 2003 ; Shalev, 1994, 1995, 1996) sur la

¹⁰ Dans le cas de Sidon, les analyses élémentaires et des isotopes du plomb ont portées uniquement sur de la corrosion des objets en alliages cuivreux (Le Roux, *et al.*, 2009).

Palestine et la Transjordanie ont permis d'obtenir des informations pertinentes concernant les techniques métallurgiques, les types d'alliages cuivreux et le développement de la spécialisation de l'artisanat pendant ces périodes. Durant le Chalcolithique (4500-3500 av. J.-C.), l'utilisation du métal était limitée au sud de la Palestine. Le minerai de cuivre était transporté jusqu'aux sites d'habitation à plus de 100 km des sources. Le grand nombre de structures pyrotechniques mises au jour dans ces sites montrent qu'une partie importante de la population participait à la production et à la mise en forme du cuivre. Les analyses ont mis en évidence les différentes recettes et pratiques métallurgiques employées durant cette période (Shalev, 1994, 1995): des alliages cuivreux riches en antimoine, en arsenic ou en nickel étaient utilisés, surtout pour leur couleur argentée dans des objets de prestige comme des masses d'armes et des couronnes. Ces objets ont été mis en forme par fonderie avec le procédé à la cire perdue. Du cuivre non-allié était utilisé pour fabriquer des outils coulés dans des moules supposés ouverts et mis en forme par déformation plastique et recuit. De l'or, contenant parfois des quantités importantes d'argent, était utilisé pour la fabrication d'anneaux massifs.

L'étude des déchets de fonderie et de minerais montre que les sites d'habitation produisaient exclusivement du cuivre non-allié (Golden *et al.*, 2001 ; Levy et Shalev, 1989). Ceci a conduit les chercheurs à considérer que seuls les outils étaient produits dans ces sites. En revanche, les objets de prestige sont supposés avoir été produits dans des ateliers à l'extérieur des zones d'habitation. Durant le Bronze Ancien I, II et III (Shalev 1994, 1995) les objets métalliques se répandent en Palestine et en Transjordanie. Les formes précédentes d'objets de prestige disparaissent alors que les outils subsistent. De nouvelles formes comme les armes à tranchant apparaissent. Les armes et les outils sont réalisés à partir de cuivre non allié ou allié avec des proportions très faibles d'arsenic (< 2 %). Les ornements de l'époque étaient faits à partir d'or, d'argent ou de cuivre. Tous ces objets sont présumés avoir été coulés dans des moules ouverts et mis en forme par des cycles de déformation et recuits. Le minerai de cuivre était traité à proximité de sa source et la mise en forme du cuivre métallique se faisait dans les sites d'habitations. Les analyses des isotopes de plomb montrent que durant le chalcolithique les sources de minerai de cuivre étaient principalement Feinan en Transjordanie à côté de la mer Morte et possiblement Timna au Sinaï à côté du golfe d'Elat (Hauptmann, 1999, Golden *et al.*, 2001). Durant la période qui suit, les sources se diversifient ce qui atteste de la mise en place d'un réseau d'échanges connectant d'une manière directe ou indirecte la Palestine, la Syrie, l'Anatolie et probablement Chypre (Philip *et al.*, 2003).

2.1.1.2- 2400-1600 av. J.-C. (Bronze Ancien IV, Bronze Moyen I et II)

Les données analytiques concernant la Syrie obtenues par Moorey et Schweizer¹¹ (1972) portent sur des objets datant du Bronze Ancien III jusqu'au Bronze Récent. Selon ces auteurs, le bronze, alliage composé de cuivre et d'étain, et le cuivre à l'arsenic étaient utilisés en Syrie au moins dès la deuxième moitié du 3^e millénaire av. J.-C. Cette étude n'explore pas l'introduction du plomb dans cette région parce que cet élément n'a pas été dosé au cours des analyses. Selon De Ryck *et al.* (2005), une baisse dans l'utilisation du bronze est attestée au nord-est de la Syrie durant la période Akkadienne (c. 2400-2200 av. J.-C.). La plus vieille attestation d'ajouts de plomb aux alliages cuivreux dans cette région date au moins du Bronze Moyen I (Philip, 1991). Les travaux de Moorey et Schweizer (1972), Stech *et al.* (1985), Rosenfeld *et al.* (1997) et Richard (2006) montrent que le bronze est utilisé dans la partie nord de la Palestine depuis le Bronze Ancien IV. Ces travaux dénotent une certaine relation entre des objets à caractère prestigieux (armes et épingles) ou religieux (statuettes) et ce nouvel alliage. Au sud de la Palestine, durant la même période, l'alliage le plus utilisé dans les poignards est le cuivre à l'arsenic (Moorey et Schweizer, 1972 ; Khalil, 1984 ; Philip, 1991). Certains de ces poignards présentaient une couleur argentée du fait d'un enrichissement de la surface en arsenic par ségrégation inverse (Shalev, 1988). Selon Philip (1991), le bronze a été introduit progressivement du nord au sud de la Palestine durant le Bronze Ancien IV. D'après cet auteur, cette diffusion lente est liée à une certaine imperméabilité culturelle au sud où traditionnellement la couleur argentée caractérise le côté prestigieux des armes. Ainsi, l'assimilation de la couleur dorée du bronze comme signe de prestige a été lente. Les analyses concernant la côte Syro-libanaise portent sur des objets qui datent de la fin du 3^e millénaire et le début du 2^e millénaire. Celles-ci, publiées par Schaeffer (1949 ; 64), montrent que le bronze était utilisé dans des grandes proportions pour des épingles, des torques, des ceintures et une hache fenestrée large provenant d'Ugarit et de Byblos¹². Durant le Bronze Moyen I, le cuivre à l'arsenic et le bronze étaient tous les deux utilisés en Palestine et en Syrie pour des armes, des figurines et des parures (Cohen, 2005 ; Moorey et Schweizer, 1972 ; Rosenfeld *et al.*, 1997 ; Shalev 2009). Ceci est en contraste avec les résultats sur Tell e-Dab'a (Delta du Nil) qui montrent une certaine préférence du bronze par rapport au cuivre à l'arsenic. Le Bronze Moyen II marque un déclin, tant au niveau du nombre d'objets en cuivre à l'arsenic, qu'au

¹¹ Les compositions ont été déterminées en analysant par XRF les surfaces nettoyées des objets.

¹² Les objets analysés de Byblos consistent en un torque, une épingle, une ceinture et une spirale provenant de la Jarre dite de Montet (Montet, 1928). Selon, Tufnell et Ward (1966), cette jarre appartient à la fin du 3^e millénaire (c. 2130-2040). Porada (1966), en se basant sur l'étude des cylindres trouvés dans la jarre, propose une date plus récente qui est située entre le milieu du 20^e siècle av. J.-C. et le milieu du 19^e siècle av. J.-C.

niveau de la proportion de l'arsenic dans cet alliage (Philip *et al.*, 2003). A Tell e-Dab'a, les analyses ont révélé une baisse d'utilisation du bronze dans les armes (Philip, 2006). Selon Philip, ceci est probablement dû à un changement de perception du rôle des armes : durant le Bronze Moyen I, ces objets étaient utilisés pour marquer un certain « statut social ». Ils se différencient alors des autres objets par leurs alliages. En revanche, la perte de ce rôle au Bronze Moyen II a entraîné l'utilisation de métaux moins coûteux comme le cuivre non allié.

Les alliages au plomb étaient employés dans des objets principalement mis en forme par coulée comme ce fut le cas des haches fenestrées étroites, des haches à collet et à lame étroite et des épingles (Philip, 1991, 2006 ; Rosenfeld *et al.*, 1997 ; Schenberg, 1985 ; Shalev, 2000, 2002, 2009).

La plupart des observations métallographiques ont été effectuées sur des poignards¹³ provenant du Levant Sud (Branigan *et al.*, 1976, Philip *et al.*, 2003, Shalev, 1988, Stech *et al.*, 1985). Elles ont porté, dans la majorité des cas, sur la partie tranchante de la lame.

2.1.2- Les propriétés des alliages cuivreux

Les comportements des métaux durant les processus de fonderie et de déformation ont été beaucoup étudiés durant le siècle dernier. Cependant, ces études ont porté sur des alliages et des comportements utiles dans le cadre de l'industrie moderne. Ainsi les alliages cuivreux archéologiques ont rarement fait l'objet d'études systématiques avant les années 1980. Pendant ce temps les archéologues et les chercheurs en métallurgie ancienne dépendaient des observations empiriques recueillies lors de leurs propres expérimentations, de l'expérience des artisans modernes ou des études ethnographiques. Ces observations permettaient de qualifier empiriquement et non pas d'expliquer l'influence de la composition de l'alliage et des différents traitements sur le comportement d'un objet métallique. Les travaux présentés concernent sont les études les plus récentes¹⁴ et les plus pertinentes réalisées sur le cuivre à l'arsenic, le bronze et le bronze au plomb.

¹³ Branigan *et al.* (1976) ont également effectué des observations sur le tranchant de la lame d'une hache fenestrée. Les objets du Bronze Moyen étudiés par Philip *et al.* (2003), consistent en 5 épingles, 2 pointes de flèches, 1 anneau et une boucle d'oreille.

¹⁴ Nous ne présentons ici qu'un bilan des études les plus complètes sur les comportements des alliages cuivreux. Toutefois, le lecteur désireux de consulter des résultats issus d'autre publication pourra se référer à Hanson, Marryat, (1926), Maréchal, (1958), Pazuchin, (1964).

En 1989, Northover publie des résultats sur les comportements thermomécaniques de cuivres à 1, 4 et 8 % d'arsenic. Il compare ces alliages avec un bronze à 5 % d'étain. Cette publication souffre du manque de précision de la description des conditions expérimentales, de la méthode de fabrication des échantillons et aussi des types de tests de déformation (laminage, compression, traction...). L'auteur fait plusieurs observations concernant les températures de recristallisation, d'homogénéisation et la relation entre le pourcentage de réduction d'épaisseur par déformation et la dureté de l'alliage et en conclut les résultats suivants :

- la recristallisation de ces alliages peut démarrer à des températures variant de 300 à 400°C ;
- les cuivres contenant moins de 2 Wt.% d'arsenic n'offrent pas d'amélioration de dureté tangible par rapport à un cuivre non-allié ;
- parmi les différents alliages testés, les cuivres à 4 Wt.% d'arsenic offrent le meilleur équilibre entre dureté et ténacité ;
- pour des compositions proches, les bronzes présentent plus de dureté que les cuivres à l'arsenic. De surcroît, du fait que la limite de solubilité de l'arsenic dans le cuivre (7.96 Wt.%) est moins élevée que celle de l'étain (15.8 Wt.%), les bronzes peuvent atteindre des duretés plus importantes par l'augmentation de la teneur en étain.

Les expérimentations de Budd et Ottaway (1991) ont porté sur sept échantillons de cuivre à l'arsenic avec des teneurs en arsenic qui varient entre 0.46 Wt.% et 11.92 Wt.%. Ces échantillons ont été coulés la première fois dans un moule ouvert en argile et une seconde fois dans un moule ouvert en métal. Ce procédé entraîne des pertes mineures en arsenic pour les échantillons contenant plus de 8 Wt.% de cet élément. Les échantillons ont subi ensuite plusieurs passes de laminage à froid. Des mesures de dureté ont été effectuées après chaque coulée et entre les passes de laminage. Les différents résultats obtenus sur les comportements mécaniques sont en accord avec ceux de Northover (1989) bien qu'ils offrent plus de précision : la dureté des cuivres à moins de 2 Wt.% d'arsenic est légèrement supérieure à celle du cuivre, les teneurs représentant le meilleur équilibre entre réduction d'épaisseur (jusqu'à 80 %) et dureté (jusqu'à 200 HV) sont comprises entre 2 et 6 Wt.% d'arsenic. Au-delà de 7 % le cuivre à l'arsenic présente plus de risques de fissuration durant la déformation. Dans la suite de ces expériences, Budd (1991) a observé que la température nécessaire à l'homogénéisation par déformation et recuit des cuivres à l'arsenic dépend de la proportion des inclusions de seconde phase étant donné que celles-ci recristallisent plus lentement que les dendrites. Il conclut qu'une température supérieure à 600 °C, appliquée pendant 30 minutes, est un traitement suffisant pour complètement recristalliser des

civres à 3 et à 6 Wt.% d'arsenic ayant subi une réduction d'épaisseur de 30 % de déformation.

Raviš et Ryndina (1984) ont effectué des tests de martelage à froid et à chaud (500 à 600 °C) pour étudier la dureté et la déformabilité des cuivres à l'arsenic contenant entre 1 et 18 Wt.% d'arsenic¹⁵. Les résultats de déformation à froid sont aussi comparés à des résultats obtenus sur des échantillons en bronze. Ils ont trouvé que le comportement des cuivres à l'arsenic et des bronzes est assez similaire.

Lechtmann (1996) offre un rapport détaillé de ses expérimentations où elle a comparé les comportements mécaniques d'échantillons de cuivres à l'arsenic (0.5, 1, 2, 3.5, 5, 7, 10, 13 Wt.% As) et de bronzes (2, 5, 7, 10, 13 Wt.% Sn). Les échantillons ont été coulés dans des moules métalliques à température ambiante et ont subi des déformations par laminage et par martelage à froid et à chaud (625 °C). Des mesures de dureté ont été effectuées sur les échantillons dans l'état brut de fonderie et après 25, 50, 75 et 87.5 % de réduction d'épaisseur par martelage (compression) et par laminage (Fig. 23) à froid et à chaud. Les résultats montre que, selon la quantité de déformation appliquée, les cuivres à l'arsenic contenant moins de 2 Wt.% d'arsenic peuvent présenter une augmentation considérable de dureté par rapport au cuivre. Comme dans les expérimentations de Northover, Lechtmann confirme que les bronzes peuvent atteindre des valeurs de dureté beaucoup plus considérables que les cuivres à l'arsenic. Cependant, dans les observations ainsi que dans les expérimentations précédentes, la comparaison entre les cuivres à l'arsenic et les bronzes est effectuée en confrontant des alliages contenant des teneurs similaires en arsenic et en étain exprimées en pourcentage massique. Lechtmann a remarqué que si la comparaison se fait sur la base des pourcentages atomiques de ces deux éléments, les deux types d'alliage présenteront des comportements mécaniques assez similaires. Ainsi le bronze ne présente pas un avantage important par rapport au cuivre à l'arsenic en ce qui concerne les comportements mécaniques.

Junk (2003) a étudié l'effet de l'ajout de l'arsenic, de l'antimoine et du bismuth au cuivre, par des essais de traction, de compression et de torsion effectués à froid ainsi que par des mesures de dureté (Vickers Hardness Test). Tous les échantillons contiennent 0.1 Wt.% de bismuth, ainsi que des proportions égales d'arsenic et d'antimoine de 0.25, 0.5, 1, 2, 3 et 4 Wt.%. Ces échantillons ont été préparés dans des moules en sable et des moules en graphite. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de Lechtmann (1996). Junk (2003 ; 167) en déduit que la déformation dépend aussi de la taille de grains, des conditions de coulée et du type du moule utilisé. Comme dans les travaux de Lechtmann (1996), ces

¹⁵ La quantité d'arsenic dans ces échantillons augmente d'un intervalle de 1 Wt.%

expérimentations montrent aussi que la plus importante augmentation de dureté est atteinte entre 23 et 50 % de déformation. Selon l'auteur, l'effet du travail de déformation n'est visible sur une structure dendritique qu'à partir 20 % de déformation. A 50 % de déformation, le métal présente une structure cristalline « fibreuse » dont l'orientation dépend de la direction du travail appliqué.

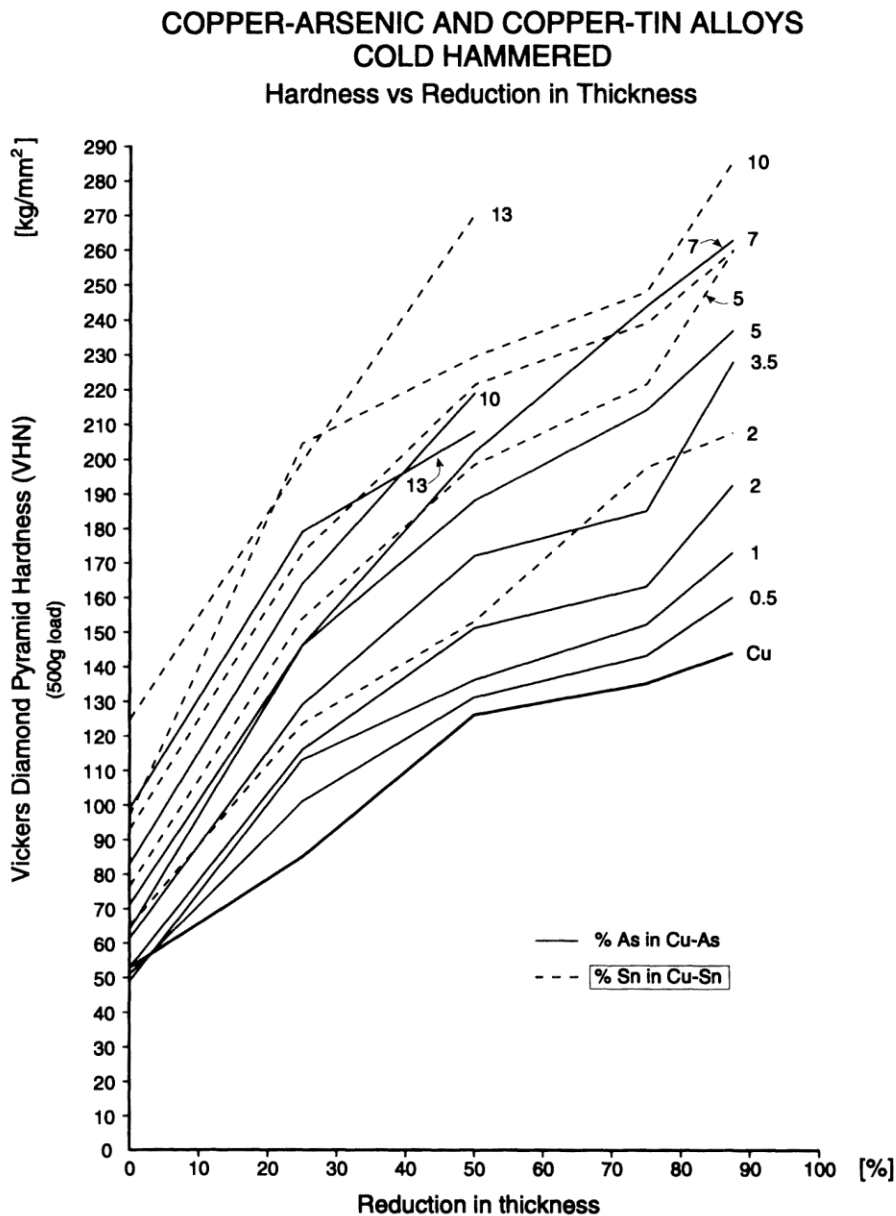


Figure 23 : Diagramme présentant l'évolution de la dureté par rapport à la réduction d'épaisseur d'échantillons de cuivres à l'arsenic et de bronzes contenant différentes teneurs en arsenic et en étain (Lechtmann, 1996).

La plupart des études concernant les bronzes ont porté sur des alliages à caractères industriels dont la composition en impuretés, comme le zinc et le phosphore, peut être très différente de celle des alliages archéologiques. De même, les études effectuées sur les bronzes ont souvent exploré les comportements sous des conditions relatives à l'industrie qui n'expriment pas nécessairement la réalité archéologique. Une grande partie de ces données a été compilée par la *Copper Development Association* (www.copper.org). La plupart des travaux portant sur l'influence de la variation de la teneur en étain sur le comportement mécanique du bronze montre des tendances presque similaires. Dans le cadre d'une thèse, les données recueillies par l'une des plus récentes études (Amendola 2010) sera prise comme base de comparaison pour interpréter le comportement des alliages archéologiques. Les travaux de Piccardo et *al.* (2004) ont porté sur 17 bronzes contenant entre 0.3 et 15.2 Wt.% d'étain, tous contenant des teneurs en zinc inférieures à 0.001 Wt.% (10 ppm). Ceux-ci ont été comparés entre eux et avec du cuivre non allié. Tous les échantillons ont été homogénéisés par un traitement thermique de 15 heures à une température de 750 °C avant d'être laminés à froid (réduction d'épaisseur de 25, 50 et 75 %) et recuits à 550 °C pendant 2 ou 5 heures. Les résultats ont montré que la dureté augmente avec la teneur d'étain et la déformation. En revanche, l'élongation maximale diminue avec la quantité de déformation. Les alliages présentant la meilleure élongation sont ceux contenant 7 et 12 Wt.% d'étain. Piccardo *et al.* (2004) ont aussi montré que la température nécessaire à l'activation de la recristallisation varie selon les teneurs en étain ; de 1 jusqu'à 12 Wt.% d'étain, le seuil d'activation diminue, pour ensuite augmenter entre 12 et 15 Wt.%. La déformation semble aussi contribuer à réduire cette température.

Des études sur l'influence des impuretés rencontrées dans les bronzes archéologiques et industriels ont été entreprises pour quatre alliages de cuivre à 9 Wt.% d'étain (Andrieu *et al.*, 2000, Pernot, 2004). Ces travaux ont surtout porté sur l'effet du soufre, du plomb et des nodules de seconde phase ($\alpha+\delta$) sous plusieurs conditions : des échantillons coulés dans des moules en graphite (à une température de 150 °C) soumis, avec ou sans recuit d'homogénéisation, à des essais de traction, de compression, de martelage et de laminage effectués à froid et à chaud. Les moules en graphite ont été choisis pour leur bonne conductivité thermique qui rapproche la courbe de refroidissement du métal de celle obtenue dans des moules en pierre. Selon le cas, des passes de déformation de 4.5 et 6 % ont été effectuées. Ces valeurs ont été choisies en accord avec des observations archéologiques montrant que les artisans effectuaient des passes de 5 à 10 % de déformation (Pernot, Montheillet, 1994). Les effets de la température (650, 700 et 750 °C) et de la durée (2, 5 et 10 min) du recuit, ainsi que celui de la déformation, sur la recristallisation ont aussi été étudiés.

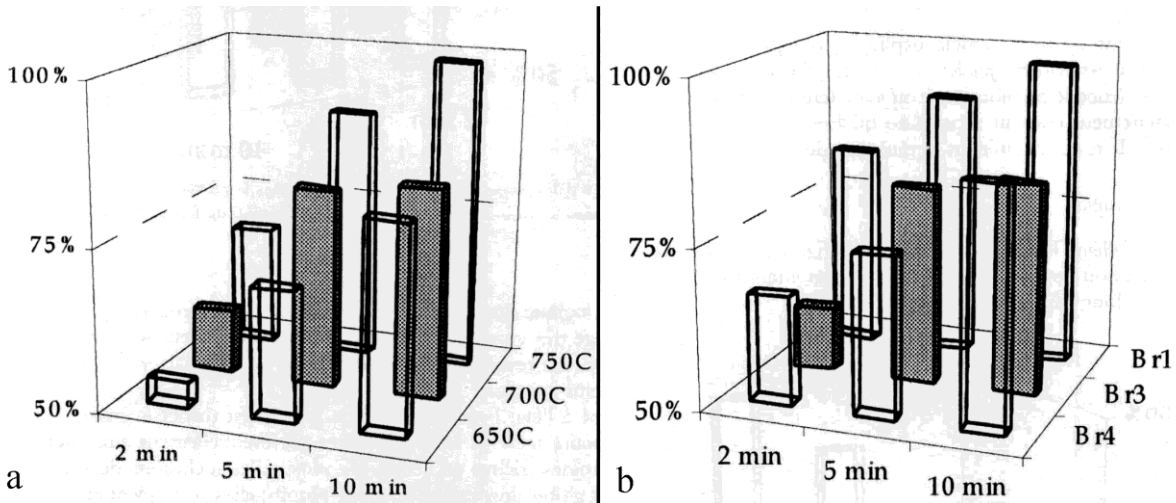


Figure 24: a- Représentation de la variation du degré de recristallisation, exprimé en pourcentage, selon différentes durées et températures de recuit pour le même bronze ; b- Représentation de la variation du degré de recristallisation pour trois bronzes à 9 Wt.% Sn contenant des teneurs et des types d'impuretés différentes (Br 1 : pas d'inclusions ; Br 3 : 0.5 Wt. % soufre ; Br4 : 0.5 Wt.% soufre et 0.5 Wt.% plomb) pour trois durées de recuit et une température constante (Pernot, 2000).

Les résultats montrent que la présence de plomb (0.5 Wt.% dans ce cas), souvent rencontrée dans les bronzes archéologiques sous la forme de nodules, réduit considérablement la capacité de déformation. Un recuit à 700 °C de 10 minutes conduit à une recristallisation, au moins partielle, de la structure cristalline. Plusieurs passes de déformation et de recuit peuvent conduire à une homogénéisation complète de la structure. L'augmentation du temps et de la température de recuit conduit à une meilleure recristallisation (Fig. 24 a). Les inclusions permanentes de sulfures de cuivre et de nodules de plomb ont pour effet de retarder la recristallisation (Fig. 24 b). Ainsi, l'artisan avait tout intérêt à utiliser des alliages propres pour diminuer le temps et la température de recuit pour consommer moins de charbon de bois et pour assurer le bon déroulement de son travail de déformation.

Le travail le plus complet concernant les propriétés des alliages cuivreux durant la coulée a été entrepris par Amendola (2010) dans le cadre d'une thèse. Cette étude a porté sur la fluidité du cuivre, des bronzes (1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 13, 14 Wt.% d'étain), des alliages cuivre-plomb (2, 5, 8, 10 Wt.% de plomb) et des bronzes au plomb (8 Wt.% d'étain et 2, 5, 8 Wt.% de plomb). Plusieurs essais de coulées ont été effectués, selon différentes températures de surchauffe¹⁶, dans un moule (Fig. 25 a et b) en acier dont les empreintes

¹⁶La température de surchauffe désigne la température supérieure au point de fusion atteinte durant la fonte.

sont disposées en trois spirales de dimensions identiques¹⁷. Il présente un système d'alimentation équipé d'un filtre en céramique pour éliminer les impuretés dans le métal liquide et pour réduire les effets de turbulence durant la coulée. Avant chaque coulée, le moule a été préchauffé à une température qui varie entre 300 et 320 °C. La fluidité de chaque alliage a été évaluée en calculant la longueur équivalente (L_{eq}) correspondant à la longueur théorique d'une spirale si le métal remplit le moule d'une manière homogène (Amendola, 2010 ; 94).

La longueur équivalente¹⁸ est calculée selon la formule suivante :

$$L_{eq} = [W \text{ (g)} / d \text{ (g/cm}^3)] / S \text{ (cm}^2)$$

Où W est le poids de la spirale, d est la densité de l'alliage et S est la surface de la section d'une spirale.

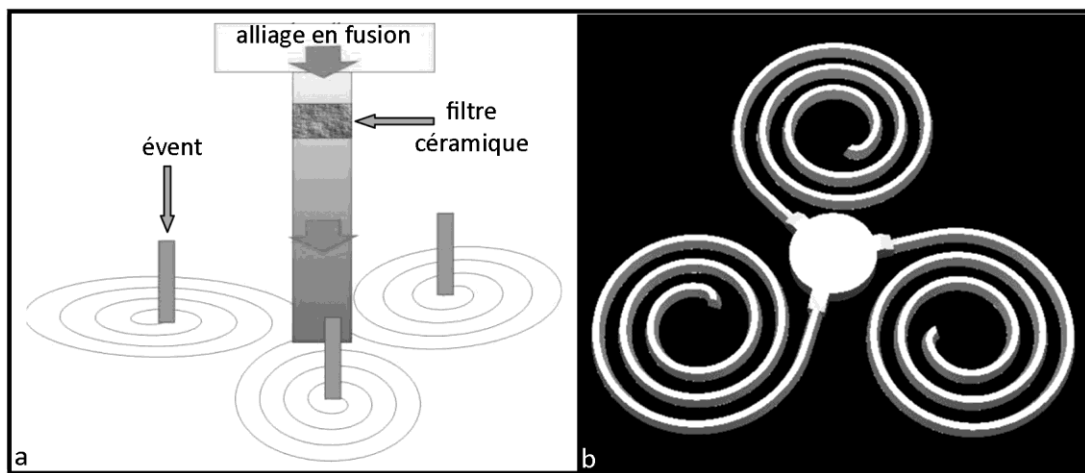


Figure 25 : a- Représentation schématique du moule en triple spirale (Amendola, 2010; fig. 5.5) ; b- Modèle tridimensionnel des trois spirales du moule (Amendola. 2010 ; fig. 5.7).

Les résultats montrent une relation directement proportionnelle entre la température de surchauffe et la fluidité. Pour une valeur de surchauffe constante le cuivre

¹⁷ Pour plus d'information sur la conception de ce moule le lecteur pourra se référer aussi à Piccardo *et al.*, (2009)

¹⁸ Les expérimentations d'Amendola (2010 ; 93-94) montrent que la mesure de la fluidité à partir de la longueur effective des spirales pose des problèmes de reproductibilité ; un amincissement de la section du métal solidifié a été constaté à l'extrémité des spirales.

montre la meilleure fluidité parmi tous les alliages testés. Les alliages cuivre-plomb présentent une fluidité médiocre par rapport aux autres alliages (Fig. 26 b). Parmi les bronzes, la meilleure fluidité est obtenue pour des teneurs comprises entre 8 et 12 Wt.% avec une valeur maximale pour 10 Wt.% d'étain (Fig. 26 a). Pour une surchauffe de 100 °C, la fluidité des bronzes au plomb augmente jusqu'à 2 Wt.% de plomb. En revanche, pour des surchauffes plus importantes que 150 °C, la fluidité augmente jusqu'à 5 Wt.% de plomb (Fig. 26 c). En complément de ses résultats sur la fluidité, Amendola a remarqué que l'ajout du plomb augmente la capillarité du bronze liquide. Ceci s'est manifesté par l'infiltration de ces alliages dans les joints du moule, ce qui n'a pas été observé pour le cuivre, les bronzes et les alliages cuivre-plomb.

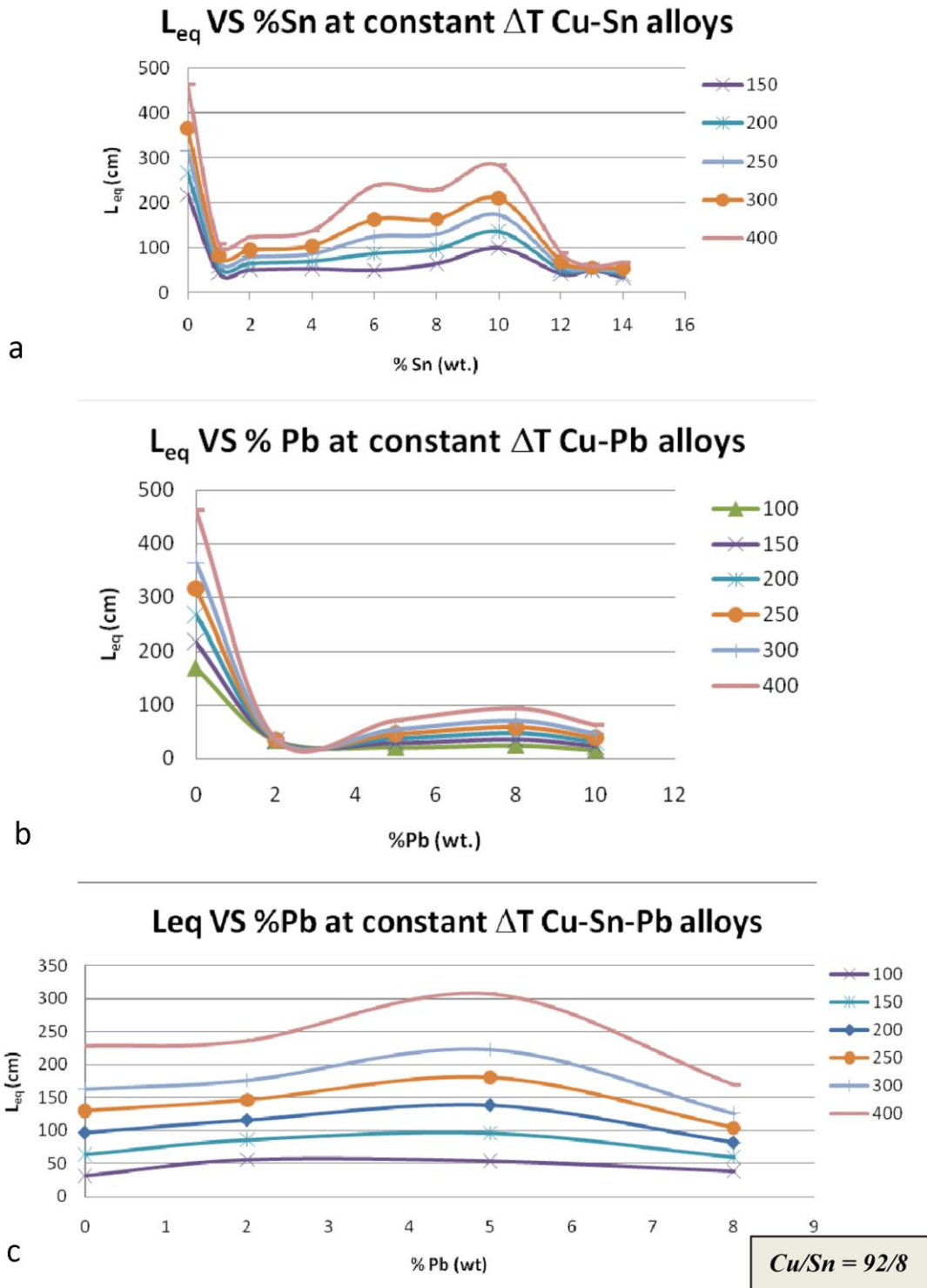


Figure 26: variation de la longueur équivalente pour plusieurs types d'alliages cuivreux par rapport à des températures de surchauffe différentes (Amendola, 2010 ; fig. 6.10, 6.14, 6.18) ; a) comparaison entre des bronzes contenant entre 1 et 14% d'étain ; b) comparaison de la longueur équivalente de cuivres au plomb (2, 5, 8 et 10 Wt.% de Pb) ; c) comparaison de la longueur équivalente de bronzes au plomb (8 Wt.% Sn et 2, 5 et 8Wt.% Pb).

Chapitre 2

Etude de la morphologie des armes

2.2- Introduction

Cette première étape de notre méthode de travail correspond à une étude à l'œil nu de la morphologie d'une arme. Afin d'essayer de comprendre le « cycle de vie de l'objet »¹⁹, des caractéristiques relevant de sa forme, de sa fabrication, de son usage, et de son état de conservation actuel sont recensées et décrites dans notre catalogue. La morphologie des armes a fait l'objet de plusieurs études typologiques et technologiques. Cependant, la terminologie employée dans ces descriptions est souvent insuffisante, peu précise ou inadaptée aux types d'armes que nous étudions.

Dans notre étude, la terminologie utilisée pour décrire la forme d'une arme et désigner ses différentes parties est tirée de celle employée dans la thèse de doctorat de G. Gernez (2007). La description des éléments relevant des techniques de fabrication est basée sur le travail de B. Quilliec (2003) sur l'épée atlantique du Bronze Final en Europe. Le travail de L. Robbiola (1990) sur la caractérisation de l'altération des bronzes archéologiques nous a servi pour décrire la surface externe de la corrosion présente sur nos armes. Cependant, une terminologie plus précise a été élaborée ici pour désigner des subdivisions dans les différentes parties de l'objet. Bien que cette subdivision morphologique n'apporte pas d'information supplémentaire à la typologie, elle reste primordiale pour une meilleure lecture technologique de l'objet et pour une plus grande précision dans la localisation des zones de prélèvement des échantillons.

Chaque objet est décrit suivant son axe principal afin de situer et d'établir les relations des différentes parties qui le composent. L'axe de l'objet est considéré comme étant la prolongation de l'axe de la partie active qui est la lame. Pour faciliter la description nous considérons que l'extrémité supérieure de l'objet est la pointe de la lame ; à l'inverse, l'extrémité inférieure de l'objet se trouve au niveau de l'emmanchement. De la même

¹⁹ Le cycle de vie d'un objet en alliage cuivreux commence par sa mise en forme, ensuite par l'usage de l'objet et se termine par son abandon ou son recyclage. Dans ce dernier cas le cycle de vie redémarre.

façon, chaque partie ou zone de l'objet pourra être divisée en deux aires, supérieure et inférieure, en fonction de leur milieu.

2.2.1- Mesures métriques

Les dimensions présentées dans le catalogue ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. Elles sont indiquées en millimètre. Les masses ont été relevées à l'aide d'une balance électronique. L'unité de mesure adoptée est le gramme. Étant donné la complexité de la morphologie des armes étudiées, les dimensions sur une même partie de l'objet peuvent présenter des variabilités. De ce fait, des mesures de dimensions maximales et/ou minimales ont été prises en compte.

En ce qui concerne les objets cassés les dimensions préservées ont été indiquées. D'autre part les épaisseurs des parties corrodées sont mentionnées bien qu'elles ne représentent pas les épaisseurs originelles. Ceci dit, l'abréviation « T.C » pour « très corrodé » est associée, à titre indicatif, aux mesures d'épaisseurs des parties manifestant une corrosion importante.

2.2.1.1- Les haches fenestrées

La description des traits individuels de forme de chaque hache porte sur la section transversale de la lame, la forme du collet et des fenestrelles ainsi que la décoration. Étant donné que la lame et le collet sont reliés par une partie intermédiaire, une nomenclature adaptée a dû être établie. La lame est reliée au collet par trois axes formant les bords longs des fenestrelles. L'axe du milieu est désigné par « axe médian », les deux axes des côtés sont appelés « axes latéraux ». Leurs largeurs et leurs épaisseurs ont été mesurées. Il convient de ne pas confondre ces axes qui sont une partie matérielle de la hache fenestrée avec des axes que nous avons définis à des fins descriptives. Une particularité importante dans la morphologie de ces haches est à souligner : l'axe du système de fixation -qui est le collet- est perpendiculaire à l'axe de l'objet. Cette configuration marque une grande différence avec les poignards et les pointes de lances où l'axe du système de fixation est aligné avec celui de l'objet. De ce fait la largeur maximale des haches fenestrées correspond à la longueur du collet. Les mesures faites sur les haches fenestrées (Fig. 27) sont les suivantes :

1-Longueur totale : elle correspond à la longueur maximale de l'objet suivant son axe.

2-Longueur du collet : elle correspond à la largeur maximale de l'objet.

3-4-Longueurs des fenestrelles : les fenestrelles présentent souvent un chanfrein, donc une ouverture superficielle que nous avons appelé fenestrelle externe et une ouverture plus profonde et de dimension plus réduite appelée fenestrelle interne.

5- Largeur minimale de l'axe médian.

6- Largeur minimale de l'axe latéral. Les parties présentes en doubles, comme les fenestrelles et les axes latéraux, sont supposées être symétriques. Ainsi, une seule de ces deux mesures est indiquée à moins que celles-ci ne soient significativement différentes.

7- Epaisseur maximale de la lame.

8- Longueur et largeur maximales de l'ouverture du collet. Dans certaines haches fenestrées larges, le collet présente une forme intérieure conique. De ce fait, les 2 ouvertures du collet ont des dimensions différentes. Toutes deux sont indiquées pour mettre en évidence la forme intérieure du système de fixation, soit la forme de l'emmanchement.

9- Epaisseur minimale du collet.

10- Epaisseur maximale de l'axe médian. Elle est mesurée à la limite de l'ouverture du collet.

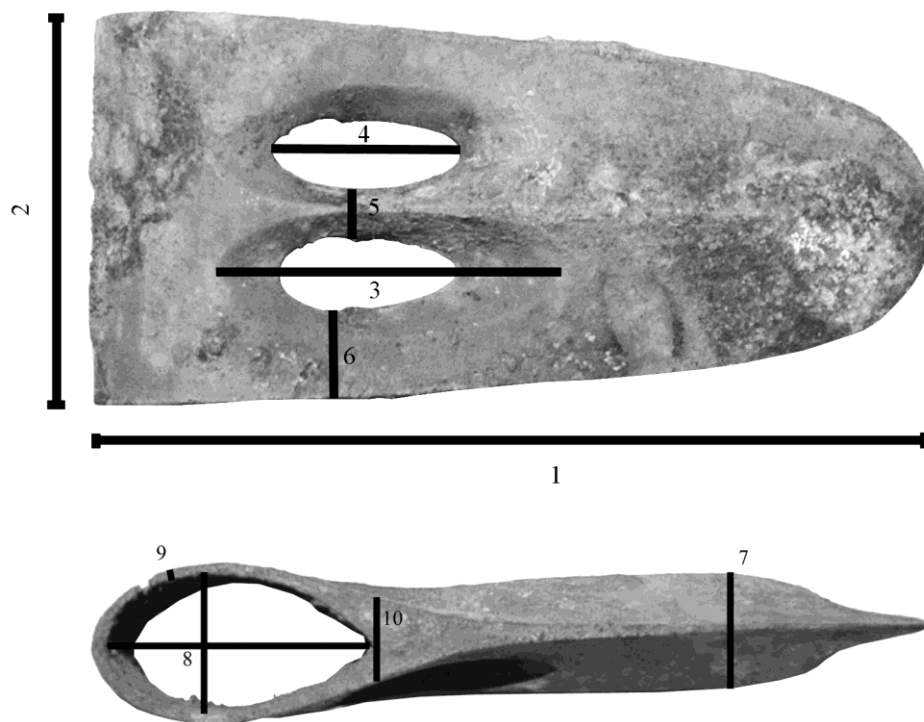


Figure 27: Les différentes mesures effectuées sur les haches fenestrées.

2.2.1.2- Les pointes de lances à douille

Les douilles de ces pointes de lances présentent la forme d'un tronc de cône. Elles sont formées par la jointure de deux bords d'une surface plus ou moins mince. Les bords formant le joint sont appelés ici « surface de joint de douilles ». Ils sont alignés à l'axe long de l'arme. Pour faciliter la description, les douilles sont divisées en trois zones de longueurs égales : Le premier tiers qui est directement associé à la lame est appelé la « zone distale » ; Le deuxième situé au milieu de la douille est appelé « zone centrale » et le troisième comprenant l'extrémité inférieure de la douille est appelé « zone proximale ». Souvent dans la partie supérieure « zone distale » ne comporte pas de joint. Celle-ci sera désignée par la « partie fermée ». Les parties concernées par les mesures (Fig. 28) sont les suivantes :

1-Longueur totale. Elle comprend l'ensemble de l'objet.

2-Longueur de la lame²⁰.

3-Largeur maximale de la lame.

4-Epaisseur maximale de la lame. Celle-ci correspond à l'épaisseur maximale de la nervure centrale.

5-Longueur de la « partie fermée » de la « zone distale ».

6-Dimensions de la section de la douille. Ces mesures sont effectuées sur l'extrémité supérieure de la « zone distale » et l'extrémité inférieure de la « zone proximale ». Fréquemment, cette dernière zone n'existe plus, dans ce cas nous mesurons l'extrémité de la zone inférieure restante. Dans le cas où l'extrémité inférieure de l'objet est cassée, nous avons pris en compte la mesure de l'extrémité restante.

7-Epaisseur des surfaces de joint de douille. Elles sont mesurées sur les parties supérieures et inférieures de la douille.

8-Epaisseur du côté opposé au joint de douille.

9-Diamètre du trou de fixation.

²⁰ La soustraction de la longueur de la lame de la longueur totale donne la longueur de la douille.

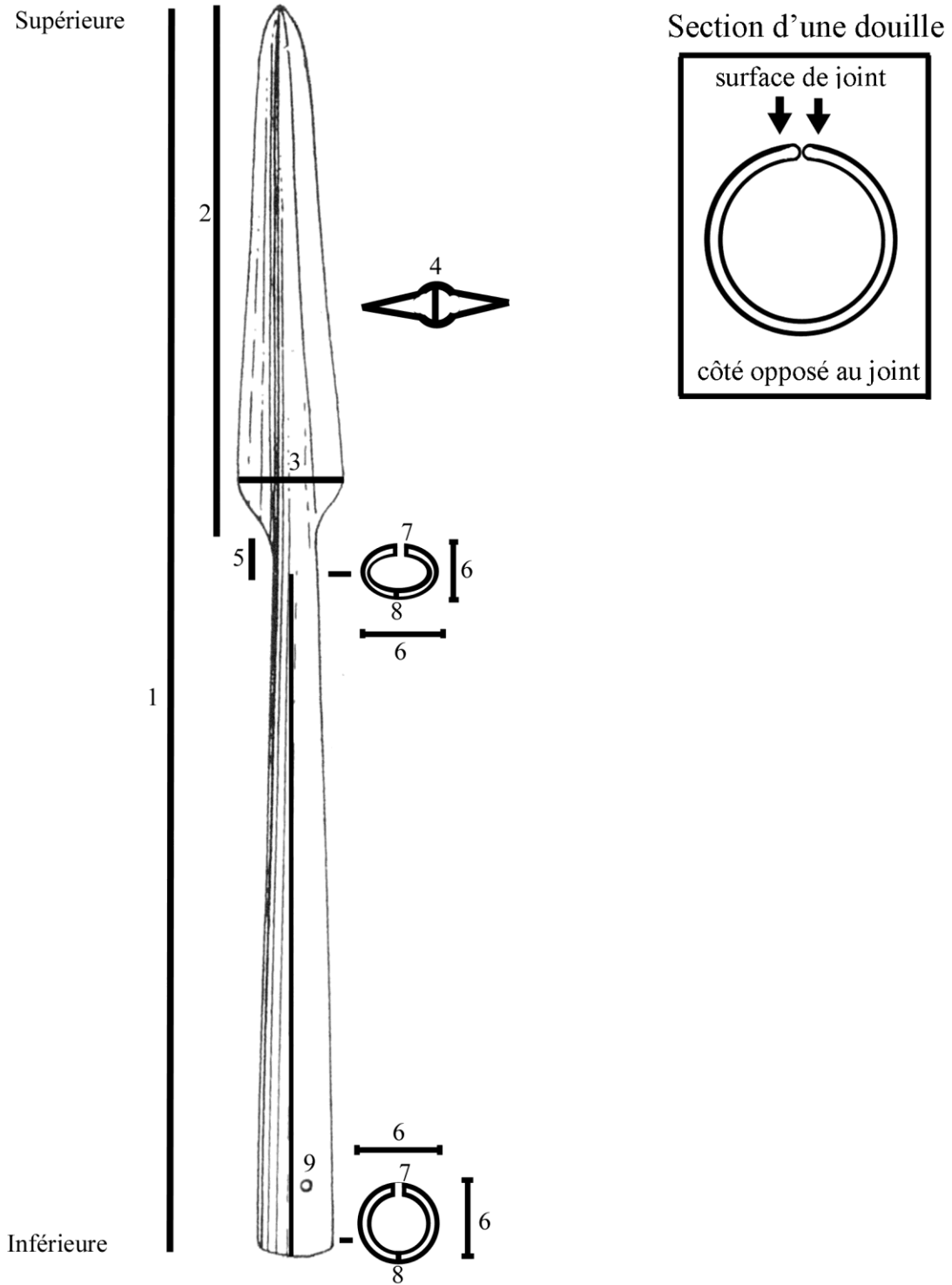


Figure 28: Croquis montrant les différentes parties mesurées. Notons aussi la direction de l'axe (supérieure, inférieure) de l'objet (d'après Dunand, 1954 ; fig. 416).

2.2.1.3- Les poignards et les pointes de lances à languette rivetée

Ces deux armes présentent le même type d'emmanchement et donc sont mesurées de façon similaire (Fig. 29) :

1-Longueur totale.

2-Longueur de la lame.

3-Largeur maximale de la lame.

4-largeur minimale de la languette. Dans le cas où la languette est de forme triangulaire ou demi-circulaire la mesure de la largeur minimale est impossible.

5-Epaisseur maximale de la lame.

6-Epaisseur minimale de la languette. Celle-ci n'est pas mesurable si l'extrémité de la languette est complètement amincie.

7-Diamètre des trous de rivet mesurables.

8-Longueur du rivet quand il existe.

9-Diamètre du fût du rivet.

10-Diamètre de la tête du rivet si il est différent de celui du fût.

Dans le cas où plusieurs rivets se présentent nous donnons les dimensions maximales et minimales des mesures 8,9 et 10.

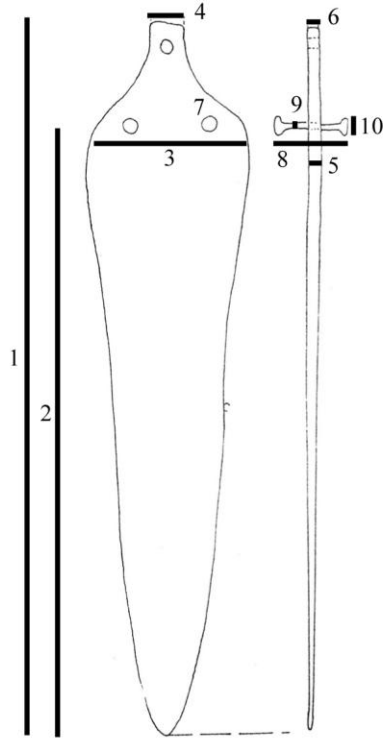


Figure 29 : croquis montrant la localisation des mesures réalisées sur les pointes de lance à languette et sur les poignards (d'après Özgüç, 1959 ; fig. 65).

2.2.2- Examen macroscopique

2.2.2.1- Les stigmates de fabrication

Ce sont des traces et des défauts créés lors de la mise en forme de l'objet. Elles sont fréquemment éliminées par les opérations de finition, mais dans le cas où elles subsistent elles peuvent révéler des indices liés au savoir faire de l'artisan.

-*Les trous de fonderie* : Ils sont créés par des bulles de gaz piégées dans le métal. Leur formation dépend de la morphologie du moule, de la vitesse de refroidissement et de la coulabilité du métal. Leur quantité et leur répartition dépendent de la forme, de la température et la porosité du moule ainsi qu'à la qualité de l'alliage cuivreux. Ainsi l'examen de ces trous peut révéler des informations importantes sur quelques étapes de la fonderie comme le sens de remplissage du moule et son inclinaison durant la coulée.

-*Les criques et les crevasse* : Ce sont des indices en creux situées respectivement sur le bord et sur la surface d'un objet. Elles sont créées sur la surface du métal suite à un retrait brusque causé par un refroidissement rapide. Durant notre étude nous avons remarqués qu'un mauvais remplissage d'un moule présentant des contraintes géométriques (des angles vifs par exemple) peut créer des indices similaires. Ces crevasses, qui sont un défaut de fonderie, ne doivent pas être confondues avec celles créées par la corrosion (voir plus bas).

-*Les barbes* : Ce sont des bavures du métal qui s'est infiltrées dans des fissures ou des joints d'un moule. Elles sont fréquemment éliminées par une opération dite « ébarbage », mais dans le cas où elles existent, elles peuvent indiquer le nombre des pièces de moule utilisé.

-Les traces de polissage. Ce traitement peut laisser des micro-stries qui ont, le plus souvent, la même direction que l'axe de l'objet.

-*Les traces d'affûtage par abrasion* : Ce traitement appliqué sur le tranchant ou sur la pointe d'une lame peut laisser des micro-stries perpendiculaires ou obliques à la ligne du tranchant.

-*Formation des trous de fixation* : Les trous de fixation peuvent être conçus dans le modèle ou dans le moule ou bien percés directement dans l'objet fini en appliquant un impact vertical ou un mouvement de rotation à l'aide d'un outil pointu. L'examen du contour du trou peut révéler la méthode de mise en œuvre utilisée.

2.2.2.2- *Les traces d'usage*

Ce sont des traces créées après la mise en forme et avant l'abandon de l'objet. Cette catégorie comprend également les traces qui auraient pu survenir au cours de la déposition d'une arme. Comme la fonctionnalité de certaines de ces armes au combat semble douteuse pour des archéologues, l'étude de ces traces peut aider à alimenter de cette problématique.

-*Les entailles sur les tranchants* : Selon l'objet qui a heurté le tranchant et la nature et la composition de l'arme, ces traces peuvent se manifester par un enfoncement dans le métal, une déchirure ou bien un enlèvement de matière.

-*Les pointes de lame émoussées* : Ce caractère est difficile à déterminer comme ces armes sont souvent recouvertes par la corrosion.

-*Les cassures et les fissures* : Elles peuvent être le résultat de l'utilisation de l'arme ou d'un rituel. Elles sont difficilement distinguées de celles survenues après l'enfouissement ou causées par un effritement dû à la corrosion.

-*le repliement partiel ou complet de l'objet* : C'est le résultat d'une action humaine qui serait survenu avant la déposition. Comme dans le cas des cassures, l'interprétation de ce stigmate est assez délicate étant donné qu'elles peuvent être créées au cours de l'enfouissement de l'arme (voir plus bas).

2.2.2.3- Les traces de post-déposition et l'état actuel de l'arme

-*Cassures, fissures, pliements et brûlures* : Ces traces survenues après l'abandon de l'arme peuvent être liées à des actions anthropiques involontaires ou à des conditions environnementales. Par exemple dans des conditions assez particulières, une pression peut s'exercer au sein d'un dépôt causant ainsi des repliements, des fissures ou des cassures sur les objets enfouis.

-*Description des surfaces corrodées* : La corrosion est l'altération (ou la dégradation) chimique d'un métal. Elle est dépendante de l'environnement du dépôt ainsi que de la structure et la composition de l'arme. Elle peut entraîner des changements de formes et une fragilisation du métal. L'étude de la corrosion permet, dans une certaine mesure, d'identifier la cause d'une cassure, d'un changement de forme ainsi que de détecter une mauvaise restauration. Nous distinguons deux types d'altération pouvant se présenter sur la surface d'un alliage cuivreux séparément ou conjointement.

L'altération peut être *homogène* avec une texture lisse ou peu rugueuse qui résulte d'une corrosion généralisée et uniforme. Elle présente un aspect brillant ou mat et une couleur de bleu-vert, vert-gris ou gris avec un éclat qui varie entre clair et sombre. Cette couche de corrosion est susceptible de conserver la forme de l'objet à l'abandon car ce processus de corrosion ne s'accompagne pas d'une augmentation apparente du volume de l'objet.

L'altération peut être à *dépôt foisonnant* de texture rugueuse et présentant deux types d'irrégularité. Celles-ci sont soit *ponctuelles* et de formes ovoïdes (comme par exemple les piqûres, les patelles et les bubons) soit *étendues* (fissures, plaques vertes ou brunes, croûtes et crevasses). Cette altération qui résulte d'une corrosion localisée s'accompagne, le plus souvent, d'une augmentation de volume et d'une distorsion de la surface originelle de l'objet.

Notons que la description de la couleur et de la texture est subjective du fait qu'elle dépend de l'œil de l'observateur et de sa perception des couleurs, faire des mesures colorimétrique sur la corrosion ne nous semble pas utile dans le cadre de notre étude.

-Les traitements de conservation et de restauration : Nous n'avons pas trouvé de rapport concernant ces traitements. Cependant des responsables de la Direction Générale des Antiquités affirment que certaines armes de Byblos ont été l'objet d'une ancienne restauration. Celle-ci consistait à baigner l'arme dans un bain d'acide pour se débarrasser de la corrosion et du polissage de l'objet. Ceci a provoqué la perte de la forme originale de l'objet et la création de traces à allure inhabituelle.

Chapitre 3

Métallographie

2.3- Introduction

L'emploi de cette technique a pour but final de reconstruire le procédé de fabrication de la zone de l'objet dont est issu le prélèvement. Elle consiste à caractériser la composition élémentaire moyenne du métal et à étudier sa microstructure (PERNOT 1999). Le métal à l'état solide présente une structure cristalline, constituée d'un agrégat de grains de différentes orientations. La taille et la forme de ces derniers dépendent de la composition du métal, de la symétrie de cristallisation, de la vitesse de refroidissement depuis l'état liquide. Ces grains sont également sensibles aux traitements mécaniques et thermiques qui peuvent provoquer respectivement des déformations plastiques et des recristallisations. L'examen de la microstructure par le microscope optique et par le MEB (microscope électronique à balayage) peut renseigner sur l'histoire métallurgique, voire thermique et mécanique, de la partie considérée de l'objet. Les échantillons sont observés selon la coupe longitudinale ou transversale par rapport à l'axe de l'objet. Ce type d'observation permet, en plus de l'identification des traitements thermomécanique, de mesurer avec précision l'épaisseur de la partie observée. Les échantillons peuvent également représenter la surface polie de l'objet. Ce dernier plan permet d'étudier l'allongement et l'orientation des inclusions comme les sulfures de cuivre. Celles-ci peuvent livrer des informations concernant les gestes du travail de déformation. Les plans d'observation des échantillons prélevés de chaque objet seront désignés par trois symboles (Fig. 30) sur les photos d'armes associées aux micrographies.

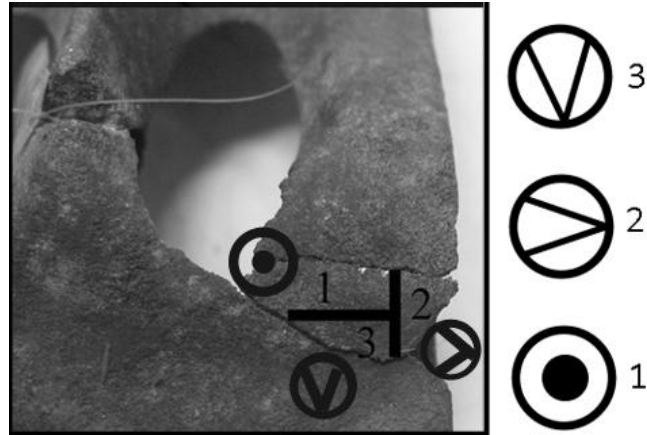


Figure 30 : Symboles utilisés pour montre le plan de d’observation utilisé pour l’examen d’un échantillon. 1-observation de la surface polie de l’objet à partir d’un échantillon ; 2 et 3- coupe longitudinale et transversale défini selon l’axe long de l’objet.

2.3.1- Prélèvement des échantillons

Mis à part les critères liés à la problématique archéologique, comme la représentativité, la chronologie et la typologie, le choix des armes prélevées a surtout été déterminé par l’état de chaque objet. La méthode adoptée dans cette étude étant partiellement destructive, l’échantillonnage des armes complètes et en bon état a été évité. De même, les armes suspectées d’être complètement corrodées ont rarement fait l’objet d’un prélèvement. Ainsi, la caractérisation métallurgique des armes cassées entières ou fragmentaires pouvant présenter du métal sain a été favorisée.

Tous les échantillons ont été prélevés à l’aide d’une scie d’horloger dont l’épaisseur de la lame est de 0.3 mm. Le choix d’une zone de prélèvement dépend de sa pertinence par rapport à l’étude des techniques de fabrication de l’arme. Pour limiter l’impact de cette intervention sur la forme des armes, les prélèvements ont été effectués à côté des cassures, là où c’était possible. Dans chaque prélèvement, au moins un plan de coupe est perpendiculaire ou parallèle à l’axe principal de l’objet. Dans la plupart des cas, les zones complètement corrodées ont été évitées.

2.3.2- Préparation des échantillons

2.3.2.1- L'enrobage

Le but de l'enrobage est d'obtenir un échantillon maintenu en permanence par un support qui facilite le pré-polissage, le polissage, l'examen aux différents microscopes et les analyses. Conventionnellement pour les pièces métalliques, une résine monomère de type *LAM PLAN 601.2* qui polymérise sous lumière bleue est utilisée. L'échantillon est mis dans un moule, avec la face destinée à l'étude sur le fond du moule, et la résine est ajoutée progressivement en polymérisant entre chaque dose dans un appareil *LAM PLAN MM.807*. Ce procédé d'application, qui évite un retrait important de la résine suite à la polymérisation, favorise la cohésion entre cette dernière et l'échantillon. Le temps de l'exposition à la lumière bleue peut varier de 15 minutes à 1 heure suivant la quantité de résine appliquée. Finalement, au dessus de la résine, nous appliquons une couche de vernis de méthacrylate de méthyle pour couvrir la face visqueuse de la résine.

2.3.2.2- Pré-polissage et polissage

Pour pouvoir examiner la structure cristalline des pièces, il faut effectuer une section dépourvue de relief ; l'élimination de ces reliefs se fait sur 2 étapes.

- Un pré-polissage, utilisant 4 papiers abrasifs 280, 400, 600 et 1000, de différentes granulométries : soit respectivement 52 μm , 35 μm , 26 μm et 18 μm . Ce procédé élimine les grosses rayures et les reliefs laissés par le sciage, puis en diminuant la granulométrie, la taille des rayures est réduite. Entre deux papiers, l'échantillon est nettoyé dans une cuve à ultrasons pour le débarrasser des résidus d'abrasion provenant d'autres échantillons, qui peuvent causer des contaminations. Pour s'assurer de la disparition des rayures du grain précédent, les rayures des grains plus fins sont réalisées perpendiculairement.

- Un polissage est effectué par la suite, pour éliminer les micro-rayures observables au microscope métallographique. Des pâtes diamantées, ici de marque *LAM PLAN MM*, de granulométries de 6 μm , 1 μm et 0.25 μm sont appliquées sur des disques tournants dont la surface est couverte de drap ou de feutre. Entre chaque granulométrie, un nettoyage à la cuve à ultrasons est nécessaire afin de débarrasser l'échantillon des résidus du polissage et des pâtes diamantés.

2.3.3- Microscope optique en réflexion

Ce type de microscope fonctionne en lumière réfléchi. Il est nécessaire pour l'observation du métal qui ne transmet pas la lumière. Nous avons disposé d'un microscope Olympus BX 60M, qui permet d'observer les échantillons en lumière réfléchi (éclairage en fond clair) ou diffuse (éclairage en fond noir). Ce dernier mode d'éclairage permet de distinguer quelques types d'inclusions comme les oxydes de cuivre, qui s'illuminent en rouge, des sulfures de cuivre, qui restent noirs. Le microscope est couplé à une caméra numérique. Tous les échantillons en alliage cuivreux ont subi un premier examen et ont été photographiés avant d'être attaqués par une solution acide. Cet examen permet d'identifier et d'étudier des inclusions et certaines phases cristallines.

La solution acide utilisée pour l'attaque des alliages cuivreux est préparée à partir d'une solution mère composée de 20 cm³ de chlorure ferrique (FeCl₃), de 2 cm² d'acide chlorhydrique (HCl) et de 96 cm³ d'éthanol (C₂H₅OH), diluée dans cinq fois son volume d'éthanol. La solution fille, appliquée sur la surface polie de l'échantillon attaque les joints des grains et/ou oxyde leurs surfaces, révélant ainsi la structure granulaire de l'échantillon en alliage cuivreux examiné.

2.3.4- Principe du microscope électronique à balayage (MEB)

Le fonctionnement de cet appareil est basé sur le balayage de la surface d'une cible par un faisceau d'électrons focalisé finement, généré par un filament de tungstène chauffé à 2700 K. L'interaction faisceau/matière génère des électrons rétrodiffusés, des électrons secondaires, des électrons Auger, des photons et des rayons X. Les deux premiers types d'émission sont utilisés réciproquement pour construire (ou produire) des images de contraste chimique (intensité proportionnelle au carré du n° atomique moyen), ou topographiques. Par rapport au microscope optique, le MEB a un grandissement maximal plus important (plusieurs dizaines de milliers de fois en fonction de l'échantillon, du microscope et du signal utilisé pour l'imagerie), le premier ne dépassant pas 1000.

2.3.5- Principe de la spectroscopie par dispersion d'énergie de rayons X (EDXS)

L'étude du métal doit être complétée par une caractérisation de sa composition élémentaire. Le MEB couplé à un dispositif EDXS permet d'effectuer des analyses qualitatives et semi-quantitatives. Le principe de cette technique est basé sur l'émission des rayons X secondaires caractéristiques des différents atomes suite à leur excitation par des électrons primaires. Ce dispositif nous permet de réaliser des analyses élémentaires pour déterminer la composition générale de l'alliage et des analyses locales pour l'identification des éléments précis comme les inclusions. Les analyses en EDXS, ne permettant pas de détecter des éléments présents dans des teneurs inférieures à 0.1 Wt.% environ en pourcentage massique, présente un grand inconvénient par rapport à d'autres techniques de haute sensibilité permettant de doser les éléments traces. Cependant le couplage MEB-EDXS présente plusieurs avantages : la possibilité de visualiser précisément la zone d'analyse de manière étendue (balayage) ou très locale (de l'ordre du μm) pour éviter de prendre en compte des produits de corrosion, mais aussi la rapidité et la facilité de mise en œuvre. Finalement, l'objectif de l'application d'analyses élémentaires dans cette étude est principalement la détermination de la recette d'alliage utilisée par les artisans et par conséquent la mesure des éléments majeurs et mineurs, ce qui est possible avec l'EDXS.

2.3.6- Conditions d'opération et de mesures des échantillons par MEB-EDXS

Nous avons disposé d'un microscope à pression variable (JEOL JSM 6460 LV) couplé à un dispositif EDXS (Oxford X-Max 20 Silicon Drift Detector). Tous les échantillons ont été examinés sous vide dégradé d'environ 20 Pa.

Durant les analyses EDXS, les pics de la série des raies L de l'arsenic ($L\alpha_{1,2} = 1.2820$ keV) et ceux de la série des raies M du plomb ($M\alpha_1 = 2.3455$ KeV) ont été utilisés pour éviter des problèmes de mesures liées au chevauchement des pics de la série des raies K de l'arsenic ($K\alpha_1 = 10.5437$ keV) et ceux de la série des raies $L\alpha$ du plomb ($L\alpha_1 = 10.5515$ keV, $L\alpha_2 = 10.4495$ keV). Les raies As L présentent généralement des valeurs légèrement plus hautes que les raies As K. Elles ont un meilleur rapport signal/bruit. Des comparaisons entre ces deux séries de raies ont été effectuées par l'analyse d'un standard InAs (Standards Microspec commercialisés par Oxford Instruments). Elles ont montré que l'utilisation des raies As L permet d'obtenir des valeurs plus proches de la composition du standard que les raies As K. Cependant, il est toujours possible que la surface analysée du standard soit altérée. Les raies As L et Pb M sont automatiquement choisies par le logiciel de traitement des analyses, INCATM, pour une gamme de spectre de 0 à 20 keV comprenant également As

K et Pb M. Ainsi, par souci de précision, seuls les pics situés dans une gamme du spectre de 0 à 10 keV ont été traités.

Pour vérifier la qualité de nos mesures des analyses par *émission de rayons X induite par particules chargées* (PIXE, conditions : 3 MeV, filtre 30 μ Co sur détecteur hautes énergies) ont été effectués au Centre de Recherches et de Restauration des Musées de France (C2RMF), Paris, sur trois échantillons archéologiques contenant différents teneurs en arsenic et en plomb. Ces échantillons ont été prélevés des armes 9031, 11109 et 12320. Les raies $L\beta$ ($L\beta_1= 12.6137$, $L\beta_2= 12.6226$) ont été utilisées à la place des $L\alpha$ pour doser le plomb. L'arsenic a été dosé à partir des raies K. Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont en accord avec les analyses EDXS (Tableau 1), à l'exception des teneurs en plomb de 12320. Cette différence est due à l'hétérogénéité de la microstructure. En effet le plomb est présent dans les alliages cuivreux sous forme de nodules de tailles variées. Ainsi, dans un même échantillon, la teneur en plomb peut changer en fonction de la zone analysée.

Dans cette étude la surface d'une analyse globale par EDXS dépend de la géométrie de l'échantillon et de son état d'altération. En général, la plus grande surface contenant exclusivement du métal sain a été choisie. Ainsi, la plupart des surfaces d'analyse globale sont plus larges que 2500 μm^2 . Le nombre d'analyses globales effectuées sur un échantillon est en moyenne de 3. Cependant ce nombre peut varier entre 2 et 22 analyses (annexe 1 : T.a. 6 à 14) selon l'état et la forme de la surface analysée.

Les résultats de chaque analyse élémentaire sont exprimés en pourcentages massiques (Wt.%) dont la somme des teneurs des éléments pris en compte est normalisée à 100 %. La méthode d'analyse adoptée implique que les mesures des éléments présents dans des teneurs inférieures à 0.5 Wt.% manquent de précision (erreur relative très importante en limite de détectabilité de la méthode). Cependant la présence des éléments, observés à des teneurs comprises entre 0.1 Wt.% et 0.5 Wt.% est signalée.

Tableau 1 : comparaison entre les résultats d'analyses élémentaires effectuées par MEB-EDXS (As raie L, Pb raie M) et par PIXE (As raie K, Pb raie L β) sur trois pointes de lance à languette rivetée 9031, 11109, 12320.

MNB ^a	méthode d'analyse	Cu	Sn	As	Pb	Sb	Fe	S	Ni	Ag	Al
9031	MEB-EDXS ^b	95.0	n.d.	4.3	n.d. ^d	n.d.	tr ^e	Tr	n.d.	n.d.	n.d.
	PIXE	95.5	< 0.1 ^c	4.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1
11109	MEB-EDXS	97.1	n.d.	1.5	0.6	n.d.	0.6	tr	n.d.	n.d.	n.d.
	PIXE	97.0	< 0.1	1.5	0.8	0.1	0.6	0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1
12320	MEB-EDXS	87.3	6.6	0.5	4.8	n.d.	tr	tr	n.d.	n.d.	tr
	PIXE	89.8	6.6	0.6	2.8	< 0.1	0.1	0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1

a-MNB: numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth

b- Les données dans ce tableau MEB-EDXS représente la moyenne de toutes les analyses effectuées sur un échantillon et normalisées à 100%. Les données PIXE ne sont pas normalisées. Toutes les données sont exprimées en pourcentage massique ; d- non détecté; e- teneur inférieure à 0.5Wt.% dosée par MEB-EDXS

Chapitre 4

Analyses des isotopes du plomb

2.4.1- Principe

Cette méthode repose sur la détermination des rapports isotopiques du plomb contenu dans un minerai ou dans ses sous-produits. Généralement, les éléments métalliques ont plusieurs isotopes dont les rapports d'abondance sont stables dans la nature. Les isotopes du plomb exploités dans cette méthode sont le ^{204}Pb , le ^{206}Pb , le ^{207}Pb et le ^{208}Pb . Le ^{204}Pb existe en quantité constante depuis la formation de la terre. Les isotopes ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb proviennent, respectivement, des chaînes de désintégration radioactive de l' ^{238}U , l' ^{235}U et du ^{232}Th .

Le rapport d'abondance des trois isotopes radiogéniques du plomb dépend du rapport d'abondance de ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th qui peut différer selon le lieu et les conditions de refroidissement de la croûte terrestre, ainsi que de la durée et des conditions de minéralisation qui vont séparer le plomb de l'uranium et du thorium (Faure, 1986, 2001). Les rapports isotopiques du plomb d'un gisement sont fonction également de la source du fluide minéralisateur, qu'il est possible de modéliser en cinq réservoirs (Kramers, Tolstikhin, 1997) présentant chacun une évolution des rapports entre ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th et ^{204}Pb différente. Ces réservoirs sont le manteau supérieur et la croûte terrestre. Cette dernière est divisée en quatre entités : jeune croûte supérieure, jeune croûte inférieure, ancienne croûte supérieure et ancienne croûte inférieure. L'interaction entre des roches et des fluides minéralisateurs issus de différents réservoirs peut modifier les rapports isotopiques caractéristiques du fluide minéralisateur (Cattin, 2008). En conséquence, chaque gisement métallifère présente une signature isotopique du plomb qui le caractérise sans que cette signature lui soit propre.

Les travaux de Barnes *et al.* (1978), de Gale (1989), de Guénette-Beck (2005) et de Cui, Wu (2011) ont démontré que les procédés d'extraction de minerai, d'élaboration et de mise en forme de métaux comme le plomb, l'argent et le cuivre n'altèrent pas, ou très peu, ces rapports isotopiques. Ainsi, en déterminant le rapport d'isotopes de plomb dans un

objet réalisé à partir d'argent, de plomb, de cuivre ou d'un de ses alliages, il est possible de déterminer la source de matière première qui aura le même rapport isotopique. Cependant, ce scénario simple et idéal est bien loin de la réalité archéologique des objets étudiés. En effet, il est vraisemblable que les objets aient été fabriqués à partir de cuivres provenant de plusieurs sources. Dans ce cas, les signatures isotopiques sont modifiées et perturbent les analyses. Egalement, l'application de cette méthode peut parfois souffrir d'un manque de données sur les anciens gisements, de l'insuffisance du nombre d'échantillons étudiés pour déterminer la signature isotopique d'un gisement ou d'un district minier, de l'absence d'études archéologiques démontrant l'exploitation ancienne d'un gisement et de la probabilité que l'objet étudié soit constitué de métal recyclé (Pollard, Heron, 2008 ; 321-328). Ainsi l'application de la méthode des rapports isotopiques du plomb pour déterminer la provenance d'un objet archéologique ne peut, en toute rigueur, qu'affirmer l'incompatibilité d'une source de matière première. L'association de ces données avec celles des analyses élémentaires et de l'archéologie peut affiner les résultats obtenus en écartant des sources incompatibles minéralogiquement et archéologiquement.

2.4.2- Préparation et mesure des échantillons

Les échantillons ont été préparés et mesurés à l'université de Gent (Laboratoire de chimie analytique) par F. Cattin. Dans cette étude, notre participation a consisté à prélever les échantillons et interpréter les résultats.

Le prélèvement des échantillons a été effectué à l'aide d'une scie d'horloger. Parmi les vingt-trois échantillons analysés, sept sont fortement corrodés (annexe 1 : T.a. 18). La corrosion peut altérer la signature isotopique de l'objet métallique. Les deux objets prélevés sur des armes d'Arqa ont été consolidés préalablement et recouverts par une résine et les pointes de lances 10279, 10280, 10301 ont probablement été nettoyées dans un bain d'acide. D'après les conservateurs du Musée National de Beyrouth, ce traitement a été pratiqué sur plusieurs objets des fouilles de Byblos. Les effets de ces traitements sur la surface d'un objet en alliage cuivreux sont assez discernables. Ces traitements peuvent présenter une source de contamination supplémentaire (Cattin, 2008 ; 183). Les pointes de lances à douille 10977, 10978, 10982 et 10997 présentent toutes des brasures sur le joint de leurs douilles et des plaques. Celles-ci ont été appliquées pour joindre à la douille une ou plusieurs plaques en bronze. Pour éviter une contamination par l'alliage de la brasure, nous avons analysé uniquement des échantillons prélevés sur des douilles du côté opposé au joint.

Les échantillons ont été nettoyés dans un bain d'HCl dilué dans une cuve à ultrasons pour lessiver la couche extérieure et éliminer les éventuels résidus en surface. Ils ont été dissouts ensuite par une solution d'eau régale. La séparation du plomb et du reste de la matière constituant l'échantillon – repris en HNO₃ (1M) - a été effectuée à l'aide de colonnes chromatographiques (Bio-Spin Disposable Chromatography Columns) par l'intermédiaire d'une résine échangeuse de cations (4,4'(5')-di-tert-butylcyclohexane-18-crown-6 ; Pb specTM). Le plomb a été ensuite récupéré par une solution d'oxalate d'ammonium 0,05 M. Pour une description détaillée du procédé d'isolation du plomb de l'échantillon, le lecteur peut se référer à De Muynck *et al.* (2007).

Les isotopes de plomb ont été analysés par un spectromètre de masse multi-collecteur couplé à un plasma inductif (Nu InstrumentsTM MC-ICP-MS). Chaque échantillon a été introduit dans une solution contenant de thallium, dont les rapports isotopiques ²⁰⁵Tl / ²⁰³Tl sont connus, pour corriger le biais de masse. Une correction additionnelle des données a été effectuée d'après Baxter *et al.* (2006). Les mesures répétées (31 fois) du standard SRM981 ont livré les résultats suivants : ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 36,669 ± 0.003, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15,482 ± 0.001, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 16,928 ± 0.001, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb = 0,91455 ± 0.00001 et ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb = 2,16612 ± 0.00002.

III - Résultats et discussions

Chapitre 1 : Microstructure des armes

Chapitre 2 : Composition des armes

Chapitre 3 : Recréations et expérimentations

Chapitre 4 : Analyses des isotopes du plomb

Chapitre 1

Microstructure des armes

3.1.1- Résultats

3.1.1.1- Les haches fenestrées

Des observations métallographiques ont été réalisées sur 11 haches fenestrées étroites et 6 haches fenestrées larges provenant de Byblos, Arqa et Yanouh. Les différentes parties constituant ces haches ont été étudiées à partir de 21 échantillons prélevés des collets, 6 échantillons des lames, 3 échantillons des axes médians et 1 échantillon d'une fenestrelle. Etant donné la ressemblance de leurs microstructures, les deux types de haches sont présentés simultanément.

La plupart des échantillons représentant le collet ont été prélevés dans sa partie la plus mince. Celle-ci varie entre 0.5 et 2 mm. Les collets présentent une structure dendritique et des pores globulaires (Fig. 31 a). Des inclusions de sulfure de cuivre ont été observées dans tous les échantillons. Elles présentent des formes globulaires ou polylobées

L'examen des coupes des collets à partir d'échantillons prélevés des haches 6271 et 11655 (Fig 31. b) a révélé des surfaces extérieures bien préservées. Dans certaines zones, celles-ci sont dépourvues de piqûres de corrosion et présentent des pores refermés ou écrasés et des inclusions de sulfure de cuivre allongés associées à des macles mécaniques. Bien que les collets des haches 6270 et 10988 présentent majoritairement une structure dendritique, des zones localisées constituées de grains polygonaux équiaxes ont été observées au niveau de la surface extérieure du collet. Ces zones s'étalent sur une profondeur maximale de 100 μm à partir de la surface. Les grains polygonaux observés sur le collet de la hache 6270 (Fig 31 c) sont associés à des macles thermiques et présentent des dimensions qui varient entre 10 et 50 μm . Dans le cas de la hache 10988, les grains ont des tailles qui varient entre 5 et 15 μm et sont généralement dépourvues de macles thermiques.

Les échantillons prélevés des axes médians des haches 6281, 6320 et 10794, ainsi que l'échantillon prélevé du bord de la fenestrelle de n°6281, présentent tous une structure dendritique avec des pores de forme souvent circulaire.

La corrosion a empêché l'examen de trois échantillons prélevés des lames. Ceux-ci appartiennent à la hache fenestrée étroite 26759. Parmi les trois restants, l'échantillon prélevé de la pointe de la lame de 10794 est partiellement corrodé, notamment sur les parties proches de la surface de l'objet. La partie préservée (Fig. 31 d) présente une structure constituée de grains polygonaux équiaxes, parfois légèrement allongés, associés à des macles thermiques et occasionnellement à des macles mécaniques. L'échantillon prélevé de la hache 6320 présente une coupe exposant la lame à partir de la fenestrelle jusqu'au tranchant (Fig. 31 e). Les observations métallographiques de cet échantillon confirment que la lame est majoritairement constituée d'une structure dendritique associée à des pores. Le tranchant, légèrement corrodé, a révélé des inclusions de sulfure de cuivre allongées, ainsi que quelques dendrites dont l'axe principal est légèrement déformé. Une grande partie de la structure cristalline, observée à partir de la coupe du tranchant de la hache 6273, est difficilement discernable (Fig. 31 f). Elle présente un aspect « fibreux » associé à une quantité considérable de macles mécaniques. Les inclusions de sulfure de cuivre observées sur l'ensemble du tranchant sont toutes allongées. La partie restante, plus proche de l'intérieur de la lame, présente des dendrites légèrement déformées et occasionnellement des pores de forme ovale ou lenticulaire.

Les haches fenestrées étroites 6270, 6271, 6272, 6281, 8349, 9076 et 77906 contiennent des quantités plus ou moins importantes de nodules de plomb. Des inclusions mélangeant deux phases ont été observées sur dix haches. Ces inclusions ont été identifiées comme étant le mélange des phases $\alpha+\delta$ riches en étain dans les cas des haches 6270, 6273, 6320, 10988 et 11708 et des phases $\alpha+\gamma$ riches en arsenic dans les cas des objets 8349, 11655, 11656, 11658 et 77906.

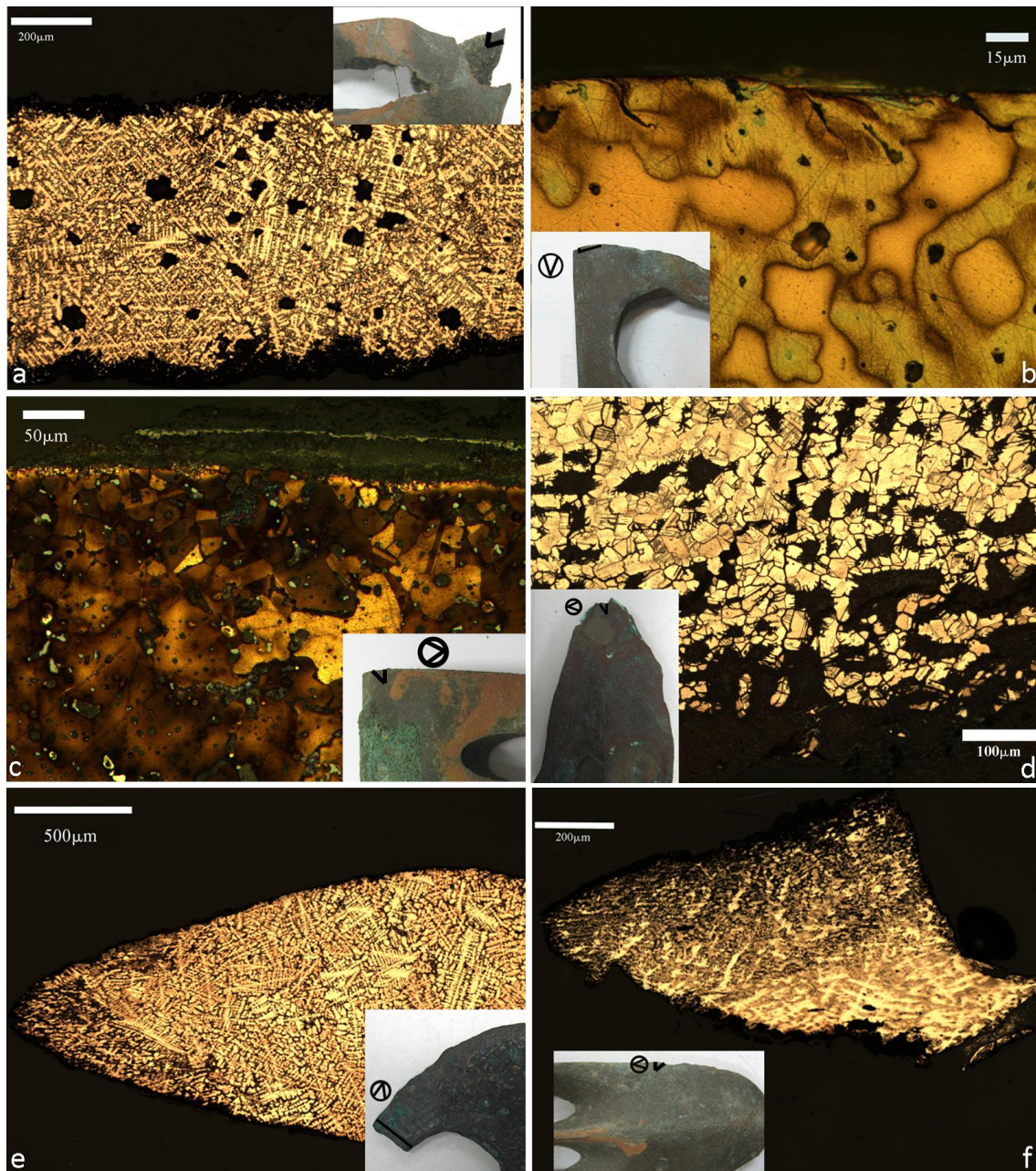


Figure 31: Echantillons de haches fenestrées attaqués par une solution de FeCl_3 observés avec un microscope optique en réflexion ; a-structure dendritique et pores (en noir) observés sur la coupe de la hache 6273, b-pores écrasés et refermés situés au niveau de la hache 11655 (observation en coupe), c-coupe de la hache 6270 présentant une couche de grains polygonaux équiaxes et des macles thermiques au niveau de la surface située sur des grains dendritiques, d- grains équiaxes, macles thermiques et mécaniques observés sur la coupe de 10794, e- structure dendritique de la lame 6320 et dendrites déformées au niveau du tranchant, f- dendrites déformées (en bas) et structure indiscernable (en haut) observées sur la coupe du tranchant de 6273.

3.1.1.2- Les poignards

Trente échantillons ont été prélevés sur 16 poignards provenant de Byblos, Arqa et Khariji²¹. Quatorze de ces prélèvements ont été réalisés sur les lames, 10 sur les parties d'emmanchement (talon et languette) et 6 sur les rivets. Toutes ces armes contiennent des inclusions de sulfure de cuivre. Les poignards 10309 et 11671 présentent une concentration importante de nodules de plomb et le poignard 10831 contient des inclusions riches en nickel, étain, arsenic et antimoine. Les échantillons prélevés de la lame du poignard 9021 et du talon du poignard 27871 (Fig. 32 a) présentent des fissures fines qui émanent de la surface de l'objet vers son intérieur. Les poignards 9021, 27871 et 27883 présentent une concentration très faible en inclusions.

Une structure constituée de grains polygonaux et allongés associés à des macles mécaniques et à des inclusions de sulfure de cuivre allongés a été observée sur les tranchants des poignards 9021, 10309 (Fig. 32 b), 10811, 11671, 11686, 11697, 11930, 27857, 27883. Dans certains cas, comme pour 9021, il est difficile de discerner les limites des différents grains. Le tranchant de l'objet 10831 présente un état différent où une structure « fibreuse » constituée de dendrites déformées et fracturées associées à des macles mécaniques a été observée. Un nombre important de ces dendrites suit l'évolution du profil du tranchant.

Le cœur de la lame a été observé sur les poignards 10831 (Fig. 32 c) et 10309 (Fig.32 d). Le Poignard 10309 présentent une structure dendritique et des pores larges des formes arrondies ou polylobées. La structure cristalline de n°10309 est constituée de grains polygonaux associés à des macles thermiques, ainsi que quelques pores minces. L'observation de la pointe de la lame de 10811 a révélé une structure de grains polygonaux équiaxes associés à quelques macles thermiques au niveau des deux extrémités de la coupe transversale de la pointe.

Les échantillons prélevés des languettes ou des talons des poignards 10293, 10811, 10831, 11854, 11930, 27857 (Fig. 32 e) et 27871 présentent des structures de grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. Les poignards 11661 et 26757 n'ont pu être étudiés à cause de l'état corrodé des échantillons correspondants. Les échantillons prélevés des talons de 11854 (Fig. 32 f) et 11930 nous ont permis d'étudier la microstructure des bords des trous de

²¹ Aucune observation ou analyse n'a pu se réaliser sur le poignard 56062 de Khariji dû à l'état complètement corrodé de son prélèvement.

rivets. Elle est constituée de grains polygonaux, allongés de petites dimensions (aux alentours de 15 μm) et présentent des macles mécaniques. La taille des grains augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du bord du trou. L'observation de la surface polie de n°11930 montre que l'allongement des grains et des inclusions de sulfure de cuivre suit la courbure du bord du trou. L'observation de la coupe de l'objet 11854 montre que le bord du trou présente un profil évasé. Comme dans le cas précédent, l'allongement des grains et des inclusions de sulfure de cuivre suit le profil du bord du trou.

Les rivets appartenant aux poignards 9021, 11661, 11671 et 11697 présentent deux types de structures cristallines correspondant au fût et à la tête. Le fût est dans un état recristallisé avec des grains de 20 μm de dimensions. Les inclusions de sulfure de cuivre rencontrées dans cette partie sont allongées et parallèles à son axe longitudinal. La structure de la tête est constituée de grains polygonaux allongés et associés à des macles mécaniques. L'allongement des grains et des inclusions de sulfure de cuivre suit la direction de la surface de la tête. Il est donc majoritairement perpendiculaire à l'axe longitudinal du fût. Le rivet du poignard 26757 est constitué d'une feuille enroulée d'une épaisseur de 500 μm . Sa structure cristalline est constituée de grains polygonaux d'une taille variant de 5 à 30 μm . Ceux-ci sont accompagnés de macles thermiques.

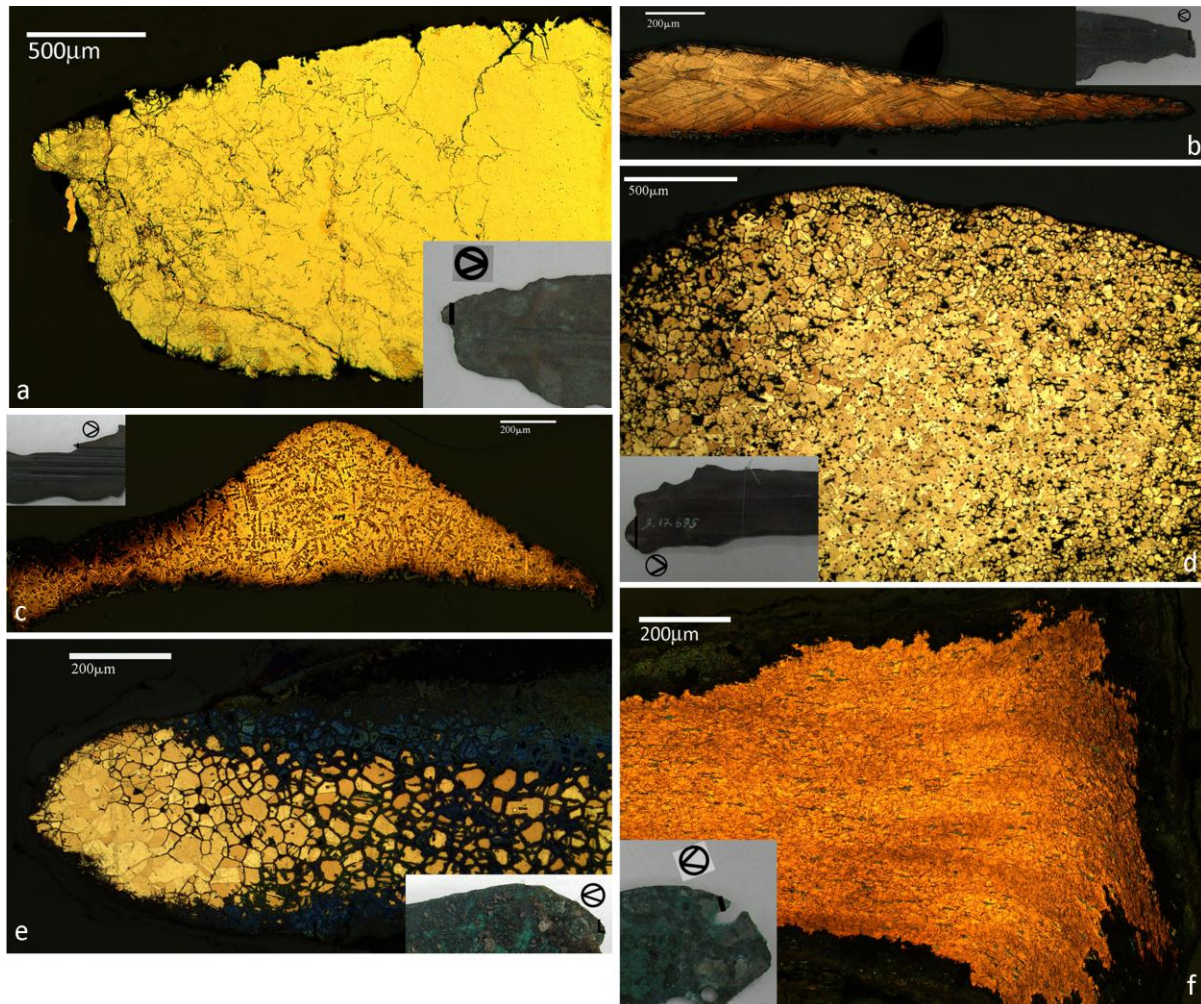


Figure 32 : Coupes de poignards observées avec un microscope optique en réflexion ; a- fissures obliques observées sur la coupe transversale de la languette de 27871, b- coupe du tranchant 11930 présentant des grains polygonaux allongés et des macles mécaniques (attaque FeCl_3), c- structure dendritique observée sur la coupe transversale d'un sillon de la lame de 10831 (attaque FeCl_3), d- grains polygonaux équiaxes, macles thermiques et pores observés sur la coupe transversale d'une nervure de la lame de 10309 (attaque FeCl_3), e- grains polygonaux équiaxes et macles thermiques observés sur la coupe transversale du talon de l'objet 27857 (attaque FeCl_3), f- coupe du bord du trou de rivet de l'objet 11854 présentant un profil évasé. (attaque FeCl_3).

3.1.1.3- Les pointes de lances à languette rivetée

L'observation métallographique a porté sur 12 échantillons prélevés sur 11 pointes de lances à languette rivetée provenant de Byblos. Parmi ces échantillons, 7 provient des lames. Les échantillons restants ont été prélevés sur les languettes. Tous les échantillons contiennent des inclusions de sulfure de cuivre. Ceux des pointes de lances 9041, 12320 et 12332 présentent aussi des nodules de plomb. Sur la pointe de lance 9041 des inclusions de seconde phase ($\alpha+\delta$) ont été identifiées.

L'examen de la structure cristalline des échantillons prélevés des languettes des pointes de lances 9031, 11102 et 12332 (Fig. 33 a) a révélé des grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. L'observation des coupes transversales des languettes de 9051 et 11109 révèle des structures légèrement différentes : des grains polygonaux allongés et associés à des macles mécaniques et à des inclusions de sulfure de cuivre allongées se répartissent à partir de la surface de l'objet jusqu'à quelques centaines de microns (100 à 300 μm selon le cas) de profondeur. L'allongement des grains et des inclusions de sulfure de cuivre suit l'évolution du profil de la coupe transversale de la languette. La zone interne de ces échantillons présente plutôt des grains équiaxes polygonaux, des macles thermiques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. Tous les grains observés dans les languettes de 9051 et 11109 sont relativement de petite taille (entre 5 et 20 μm) par rapport à ceux observés dans les languettes des autres pointes de lances (entre 30 et 120 μm). Les grains allongés ne sont pas nécessairement présents sur toute la zone superficielle de la languette : par exemple les bords du trou du rivet de la languette de n°9051 (Fig. 33 b) présentent des grains polygonaux équiaxes et des macles thermiques. Le profil du bord de ce trou est en double biseau. L'orientation de l'allongement des inclusions de sulfure de cuivre observées dans cette partie correspond au profil de ce trou.

L'observation des échantillons prélevés au niveau des tranchants des lames des armes 9046, 10334, 11110, 12320 a révélé une structure, plus au moins discernable, constituée de grains polygonaux allongés, avec des macles mécaniques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. Les grains constituant la structure cristalline des nervures de lame de n°9050, 12329 (Fig. 33 d) et 12332 sont polygonaux, équiaxes et associés à des macles thermiques ainsi qu'à des inclusions de sulfure de cuivre allongées.

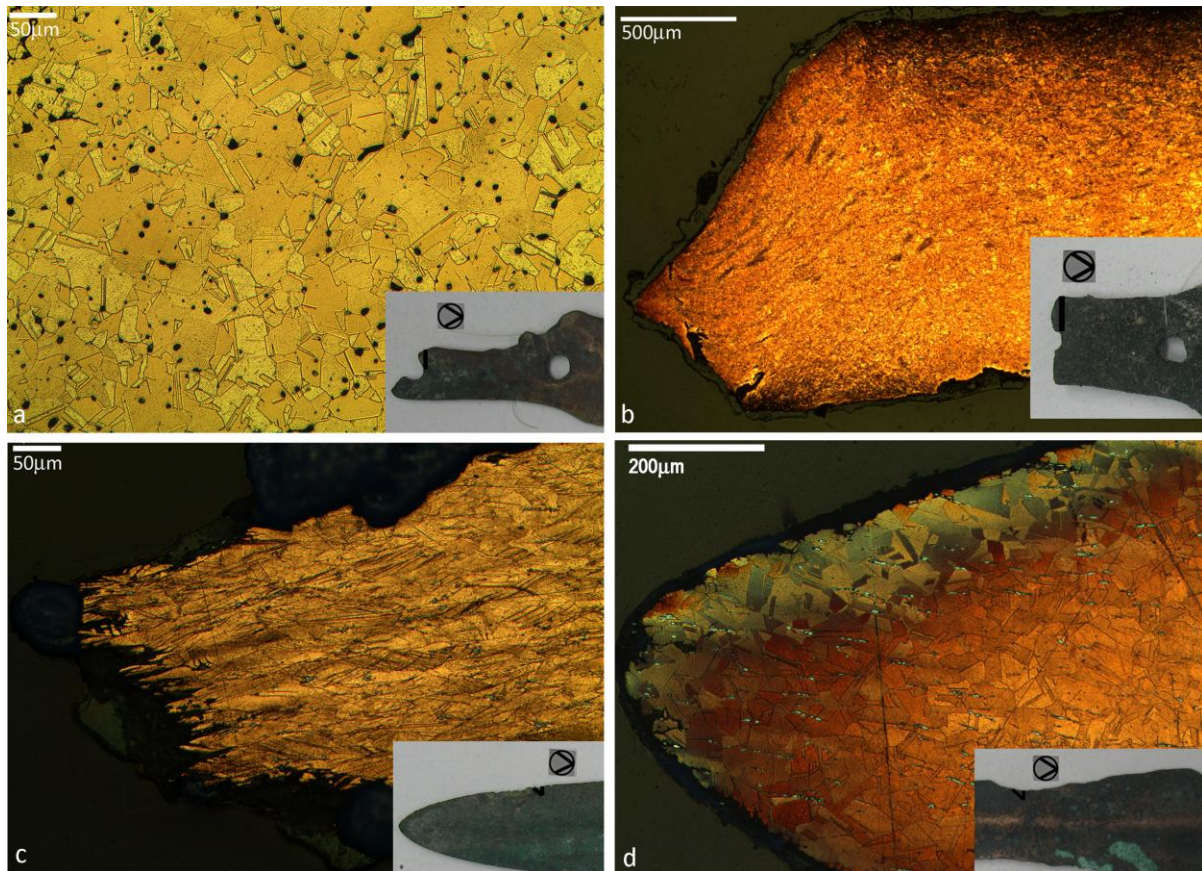


Figure 33 : Echantillons de pointes de lance à languette rivetée attaqués par une solution de FeCl_3 observés avec un microscope optique en réflexion, a- coupe transversale de la languette de l'objet 12332 présentant des grains polygonaux équiaxes, des macles thermiques et des nodules de plomb (en noir), b- coupe transversale du trou de rivet de 9051 présentant un profil en double biseau, c- grains polygonaux allongés et macles mécaniques observés sur la coupe du tranchant de l'objet 11110, d- grains polygonaux équiaxes et macles thermiques observé sur une coupe de la nervure de l'objet 12329.

3.1.1.3- Les pointes de lances à douille

Vingt-six pointes de lances à douille ont été étudiées par métallographie. Les lames sont représentées par 5 échantillons. Les douilles ont été examinées à partir de 17 échantillons prélevés des « zones distales », 7 des « zones centrales » et 15 des « zones proximales ».

La plupart des pointes de lances contiennent des inclusions de sulfure de cuivre. Les armes 10274 et 10277 constituent les seules exceptions. Des inclusions observées dans les armes 10274, 10277, 10301 et 10303 ont été identifiées au MEB-EDXS comme étant riches en arsenic et en antimoine (annexe 2 : A.a. 2, 3, 4). Les pointes de lances 10336, 10325, 10810, 56064, 56066 et 77137 présentent, en plus des inclusions de sulfure de cuivre, une quantité importante de nodules de plomb. Des formations de seconde phase ($\alpha+\delta$) ont été observées dans les douilles des pointes de lances longues 11854, 27855, 27856 et 27884. Elles sont surtout rencontrées dans les « zones distales » (Fig. 34 c). Leur proportion diminue considérablement dans les « zones centrales » et « proximales ». Ces quatre pointes de lances présentent aussi des fissures au niveau des douilles. Les micrographies montrent que le métal utilisé dans toutes les pointes de lances longues de Byblos, à l'exception de n°10336, contient relativement moins d'inclusions de sulfure de cuivre et de nodules de plomb que pour les autres pointes de lances.

L'examen des échantillons prélevés sur le tranchant des lames de 10322 (Fig. 34 a), 10810 et 10997 a révélé une structure constituée de grains polygonaux allongés associés à des macles mécaniques et des inclusions de sulfures de cuivre allongées. Des grains polygonaux équiaxes et des macles thermiques ont été observés sur les échantillons prélevés de la pointe de la lame de 56064 (Fig. 34 b) et du tranchant de la lame de 10303.

Tous les prélèvements réalisés sur les douilles présentent une structure constituée de grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques (Fig. 34 c). Les inclusions de sulfure de cuivre observées dans les parties supérieures des « zones distales » sont souvent ovales et peu allongées. Dans les parties inférieures des « zones proximales », ces inclusions sont considérablement plus allongées et parfois fracturées comme dans les cas des objets 10279, 10280, 10810 (Fig. 34 d et e) et 10977. Quand nous avons eu l'occasion d'étudier les différentes parties d'une même douille, comme pour les armes 10810, 10978 et 11856, nous avons pu constater une augmentation progressive de l'allongement de ces inclusions depuis la « zones distale » jusqu'à la « zones proximales ». L'orientation de l'allongement des inclusions de sulfure de cuivre peut être oblique, perpendiculaire et parallèle à l'axe longitudinal d'une pointe de lance. Cependant, les inclusions à allongement oblique sont majoritaires dans la plupart des cas (Fig. 34 d). Les surfaces de joint de douille échappent à cette configuration où l'allongement des inclusions est plutôt parallèle à l'axe

(Fig. 34 e). De même, là où les extrémités inférieures des douilles ont pu être étudiées (10870 et 11200), une dominance des inclusions à allongement perpendiculaire à l'axe a été observée.

Peu d'informations ont pu être récoltées sur les directions d'allongement des inclusions riches en arsenic et en antimoine des pointes de lances 10277, 10301 et 10303. L'examen des échantillons prélevés de la partie inférieure de la zone proximale de la douille de 10274 (Fig. 34 f) montre que l'allongement de ces inclusions est majoritairement parallèle à l'axe longitudinal et change d'orientation au niveau de l'extrémité la douille en devenant perpendiculaire à l'axe. Les phases riches en As et Sb sont généralement aplaties et fracturées. Elles présentent des formes en « grappe » ou en « zigzag ».

Chacune des douilles des pointes de lances 10976 (Fig. 35 b), 10977, 10982 et 10997 (Fig. 35 c) est entourée par une ou deux plaques en alliage cuivreux. Généralement, le joint de la douille et celui de la plaque ne se superposent pas. L'observation métallographique a permis de mettre en évidence l'existence d'un fragment du même type de plaque sur la douille de la pointe de lance 10978 (Fig. 35 a). Les plaques ont une structure constituée de grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques et des inclusions de sulfure de cuivre. Une couche métallique identifiée au MEB-EDXS comme un alliage argent/cuivre (annexe 2 : A.a. 1) connecte la douille et les plaques entre elles (Fig. 35 a, c). L'examen des prélèvements effectué sur différents emplacements de la douille montre que cette couche est présente uniquement au niveau du joint de la douille et des parties des plaques qui lui sont superposées. La structure cristalline de cette couche est constituée de dendrites α riches en cuivre entourées du mélange eutectique riche en argent (Fig. 35 e). Les échantillons étudiés montrent que la largeur de cette couche peut varier entre 3000 et 5000 μm et son épaisseur entre 50 et 150 μm . L'observation de l'interface entre la douille et cette couche d'une part, et entre la couche et la plaque d'autre part, a révélé une certaine adhésion entre ces trois parties (Fig. 35 d). Cette adhésion a été confirmée par les analyses MEB-EDXS qui attestent la diffusion de l'alliage argent cuivre dans la plaque et la douille.

Finalement l'observation des bords d'un trou de fixation, situé sur la zone proximale de l'objet 10834, montre qu'il a le même profil évasé que celui observé sur le poignard 11856. Ils présentent tous deux des grains polygonaux allongés associés à des macles mécaniques.

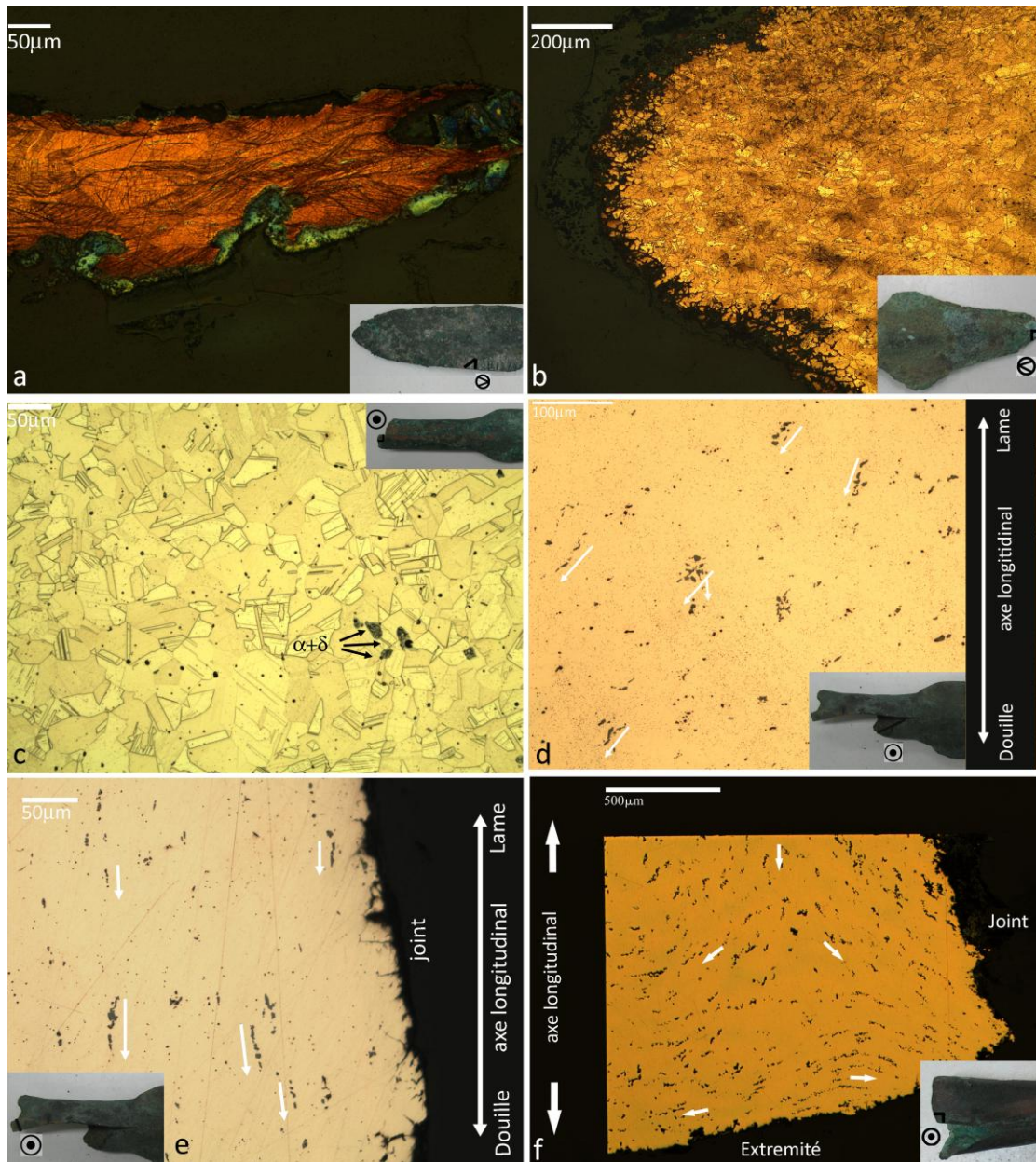


Figure 34 : échantillons de pointes de lance à douille observés avec un microscope optique en réflexion ; a-grains polygonaux allongés et macles mécaniques observés dans la coupe du tranchant de 10322 (attaque FeCl_3), b- grains polygonaux équiaxes et macles thermiques observés dans la coupe transversale de la pointe de 56064 (attaque FeCl_3), c- grains polygonaux équiaxes, macles thermiques et inclusions de seconde phase ($\alpha+\delta$) observés sur la surface polie de la zone distale de 27855 (attaque FeCl_3), d- surface polie de la zone distale de 10810 présentant des inclusions de sulfure de cuivre obliques par rapport à l'axe longitudinal de l'arme, e- inclusions de sulfure de cuivre parallèles à l'axe de l'arme observées sur la surface de joint polie de la zone centrale de 10810, f- surface joint polie de 10274 présentant des inclusions riches en As et Sb, l'allongement de celles-ci changent d'orientation en s'approchant de l'extrémité de la douille.

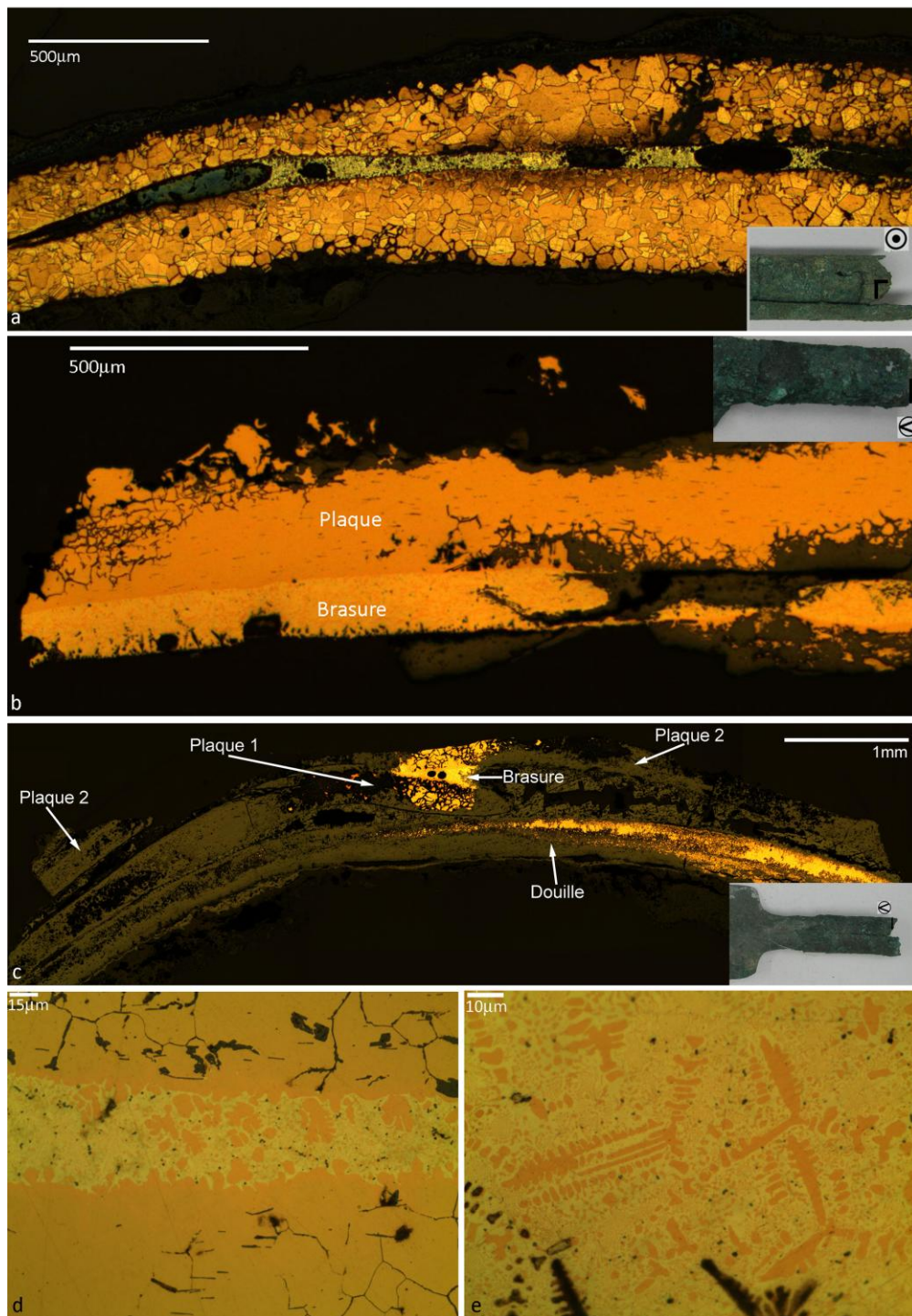


Figure 35 : a-douille (en bas) et plaque (en haut) assemblées par une brasure en alliage argent-cuivre (au milieu, de couleur bleu grisâtre) observées sur une coupe de la douille de l'objet 10978 (attaque FeCl_3), b- coupe de la douille de 10976 présentant une plaque ajoutée (en haut) et une brasure en alliage argent-cuivre (en bas), c- coupe de la douille de 10997 présentant la douille et deux autres plaques assemblées par une brasure, d-coupe de la douille de l'objet 10978 montrant l'adhésion entre la brasure, la plaque et la douille, e- structure de la brasure présentant des dendrites riches en cuivre (en orange) entourées du mélange eutectique (bleu grisâtre) riches en argent.

3.1.2- Discussion

3.1.2.1- Les Haches fenestrées

Les interprétations des microstructures présentées ici sont basées sur les travaux de Scott (1991). Les haches fenestrées larges et étroites présentent majoritairement une structure dendritique associée à des pores et des inclusions non allongées. Ce type de structure est caractéristique d'un état brut de fonderie. Ce même type de structure a été détecté par Caspi et al. (2009) sur deux haches fenestrées larges découvertes à 'Enot Shuni en Israël.

La présence de grains polygonaux et de macles thermiques sur la pointe de lame de 10974 montre clairement qu'au moins une passe de déformation à froid²², suivie par un recuit, a été appliquée sur la pointe de la lame. L'allongement et les macles mécaniques observées sur quelques grains sont le résultat d'une légère déformation appliquée après le dernier recuit. Les dendrites déformées, la structure « fibreuse » ou indiscernable, les macles mécaniques et les inclusions de sulfure de cuivre allongées relevées au niveau du tranchant des haches 6320 et 6273 sont toutes caractéristiques d'un travail de déformation.

Tous ces résultats nous permettent de considérer que les procédés de fabrication des haches fenestrées étroites et larges sont similaires. Une grande partie de la forme d'une hache fenestrée est obtenue par fonderie. Les moules utilisés pour la réalisation de ces pièces sont des moules à pièces multiples ou des moules pour la cire perdue. Les moules à pièces multiples sont constitués de deux pièces qui produisent la forme extérieure de la hache et un noyau, probablement en terre cuite, pour créer le trou du collet. A la différence d'un noyau en pierre ou en bois, le noyau en terre peut être facilement éliminé de la pièce coulée en le cassant. En plus il présente l'avantage d'être facilement produit par moulage ou par modelage. Les opérations appliquées après la coulée apportent peu de modifications à la forme générale de l'arme. L'ébarbage constitue l'une de ces opérations : il consiste à éliminer tous les excès de métal tel que les bavures et l'entonnoir de coulée. Des moules en pierre de haches fenestrées découverts à Byblos (Dunand, 1937 ; pl. 108, Dunand, 1950 ; pl. 184), à Ebla en Syrie (Festuccia, 2000 ; fig. 5) et Kültepe en Anatolie (Ozgülç, 1986 ; pl. 86, 89) montrent que l'entonnoir est en connexion avec la pointe de la lame. L'élimination de l'entonnoir, présentant une largeur d'au moins 2 cm, par découpage ou par abrasion suivie

²² Nous n'avons aucun indice de travail à chaud du bronze à l'Age du Bronze.

par la mise en forme de la pointe de lame, entraînent une grande quantité de déformation. Cette déformation durcit le métal et pourrait par conséquent le fragiliser. Elle pourrait donc conduire à la rupture de la lame. Pour éviter ce problème, les artisans chauffent le métal après l'application d'une quantité de déformation importante. Ce traitement, désigné sous le terme de « recuit », conduit à la recristallisation de la structure déformée en formant des grains polygonaux équiaxes. En conséquence, le métal redevient malléable, ce qui permet ainsi la poursuite du travail de déformation qui peut être interrompu une ou plusieurs fois par ce type de traitement. Ce procédé permet d'expliquer la structure observée sur la pointe de lame de la hache 10794 présentant des grains polygonaux équiaxes alors que le reste de la hache est dans un état brut de fonderie. Branigan *et al.* (1976) ont observé des structures similaires sur la lame d'une hache fenestrée étroite dont le contexte archéologique et la provenance ne sont pas déterminés. L'entonnoir de coulée pourrait également être éliminé en découpant le métal à chaud. Dans ce cas, on parle de « fracture à chaud ». Ce type de traitement pourrait provoquer le même type de microstructure (Andrieu *et al.*, 2000).

Une fois l'ébarbage terminé, le tranchant et la pointe ont subi un travail de déformation plus ou moins important. Cette opération a conduit à la création de structures déformées, ou écrouies, observées sur le tranchant des haches 6273 et 6320 et sur la pointe de lame de 10794. L'application d'une déformation dans ces zones de la lame relève d'une volonté d'augmenter la dureté de la partie active et pourrait être associée à un travail d'amincissement du tranchant et probablement d'un affûtage. Cette opération a été appliquée sur toutes les armes.

Les pores refermés observés au niveau de la surface des haches 6271 et 11655 sont caractéristiques d'un travail de polissage. Cette opération de finition est une phase incontournable dans le travail de post-fonderie. Elle consiste à lisser la surface du métal et lui rendre son éclat en éliminant la patine superficielle qui s'est formée durant la mise en forme. Au vu de la surface peu corrodée de ces deux haches et du fait des travaux de restauration entrepris sur des objets métalliques au Musée National de Beyrouth, il est envisageable que ces traces de polissage soient produites par une intervention récente. D'après les responsables des collections de ce musée, ces travaux consistaient à nettoyer la corrosion par des bains d'acide et par des opérations de polissage. En raison du manque de documentation disponible sur ces travaux de restauration, aucune conclusion définitive sur l'ancienneté de ces traces ne pourra être apportée ici.

La présence d'une couche de grains recristallisés, donc de forme polygonale équiaxe, au niveau de la surface des collets des haches 6270 et 10998, atteste d'au moins une passe de déformation et de recuit. Plusieurs types d'interventions auraient pu produire une telle

structure : l'élimination d'une bavure épaisse ou une réparation du collet par un travail de déformation. Dans le cas de l'objet 10998, la destruction du collet par découpage à chaud est une autre possibilité à prendre en compte.

Les parties présentant les épaisseurs minimales des collets, variant de 0.5 à 2 mm, ont été mises en forme par coulée. Les empreintes des moules dont les sections sont aussi minces pourraient présenter le risque d'un mauvais remplissage par le métal en fusion. Ce problème est lié à des forces agissant à l'intérieur du moule telle que la tension de surface. La réalisation de collets aussi minces ne présente aucun avantage technique en termes de fabrication et n'améliore pas la fonctionnalité de l'arme. Dans ce contexte, il faudrait peut être considérer cette caractéristique comme résultant d'un choix esthétique.

3.1.2.2- *Les poignards*

La structure recristallisée et complètement homogénéisée observée dans les parties d'emmanchement du poignard a été créée par au moins une passe de déformation suivie d'un recuit²³. Ces opérations ont probablement été effectuées dans le but d'éliminer l'entonnoir de coulée et de compléter la mise en forme. Les moules de poignards retrouvés à Byblos (Dunand, 1954 ; 224), à Arqa (Gernez 2006 ; pl. 144), à Tell el-Dab'a (Philip, 2006 ; 195) montrent que l'entonnoir de coulée est le plus souvent connecté à la partie d'emmanchement. Les petites dimensions de grains au niveau du bord des trous de fixation montrent que ces derniers ont subi une déformation plus importante que le reste de la languette. Ils ont probablement été percés après la mise en forme de la languette. L'aspect évasé du bord du trou observé sur 11854 a probablement été produit par un perçage unidirectionnel du talon (Fig. 36 a). L'état écroui sur les bords des trous de fixation aurait pu être produit par le perçage ou par un ajustement aux cours de l'installation du rivet après le procédé de perçage. Le premier cas implique que ce travail de perçage n'a pas été suivi d'un recuit.

Tous les tranchants étudiés présentent une structure écrouie qui, comme dans le cas des haches fenestrées, est probablement créée par l'amincissement et possiblement l'affûtage de la lame. Cependant, la présence de grains polygonaux allongés implique qu'au moins un traitement de recuit aurait été appliqué au cours de la déformation. Le même type de structure a été observé sur les tranchants de poignards typiques du Bronze Ancien

²³ Toute opération de mise en forme commence par la production d'une ébauche par coulée. L'intensité et le type de travail de déformation qui pourrait s'en suivre dépend de la forme de l'ébauche et des propriétés que l'artisan veut attribuer à son objet.

IV et du Bronze Moyen au Levant Sud (Branigan *et al.* 1976, Stech *et al.* 1985, Shalev 1989). Les lames décorées des poignards 10309 et 10831 ont été mises en forme par deux procédés différents. La structure recristallisée observée au cœur de la lame à double nervure du n°10309 montre qu'une partie de la mise en forme de la lame a été effectuée par un travail de déformation et de recuit. Cependant, ce travail n'a pas été suffisant pour éliminer les pores et complètement homogénéiser cette zone de la lame. La structure dendritique observée dans la lame à cinq sillons du poignard 10831 est caractéristique d'un état brut de fonderie. Ainsi le procédé de la mise en forme de la lame de ce poignard se résume à la coulée. La même interprétation a été avancée par Branigan *et al.* (1976) suite à l'observation d'une structure similaire sur la lame d'un poignard à cinq sillons ou filets étudié. D'ailleurs l'étude des empreintes de moules trouvés à Byblos, à Arqa et à Tell el-Dab'a nous permet de confirmer l'interprétation des observations métallographiques (Fig.37 a, b, c) ; les décorations des lames de poignards sont réalisées par coulée, bien qu'elles puissent subir des retouches par déformation. Ce travail de déformation est important au niveau des tranchants et de la pointe comme dans le cas de l'objet 10811 qui présente une structure de recuit (grains polygonaux équiaxes).

Les différentes structures cristallines des rivets décrivent deux actions différentes :

-L'état recristallisé et les inclusions de sulfure de cuivre allongées du fût du rivet sont le résultat de la mise en forme. Cette action aurait allongé et homogénéisé l'ébauche obtenue par moulage.

-L'état écroui et l'allongement des inclusions de sulfure de cuivre perpendiculaires à l'axe au niveau de la tête correspond à un aplatissement qui aurait été créé lors de la fixation du rivet pour joindre le manche et le poignard.

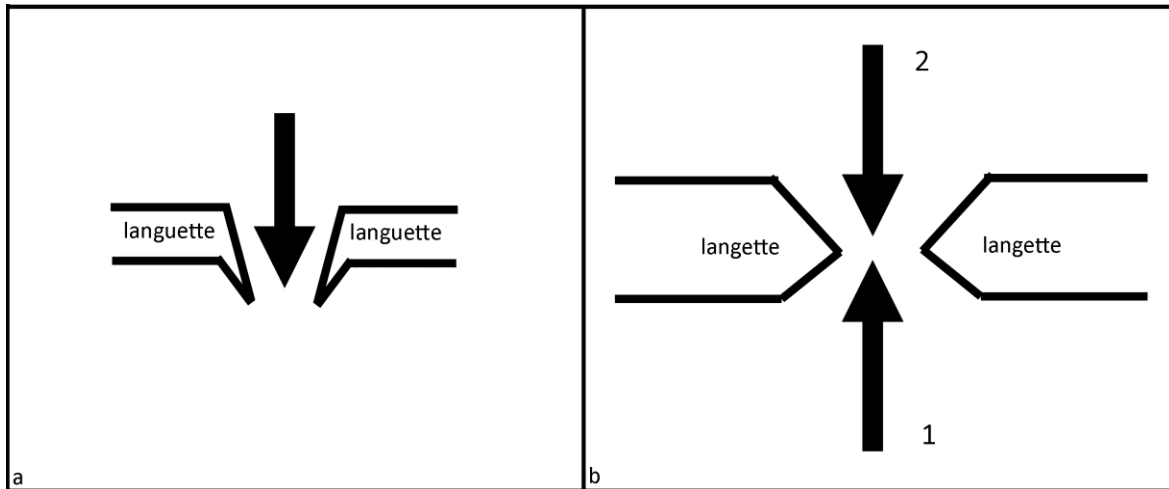


Figure 36 : Figures 6 : a- schéma représentant le perçage unidirectionnel utilisé pour créer les trous de fixation des poignards ; b- perçage bidirectionnel utilisée pour créer les trous de fixation des pointes de lance à languette rivetée.

3.1.2.3- Les pointes de lances à languette rivetée

Elles présentent des structures cristallines similaires : la languette et la lame présentent une structure recristallisée et le tranchant, une structure écrouie. La forme finale de ces armes a été obtenue, comme pour la plupart des poignards, par un travail de déformation et des recuits.

La différence principale entre les poignards et les pointes de lances rivetées réside dans le procédé du perçage du trou de rivets. Alors que dans le cas des poignards, le perçage est unidirectionnel, les languettes des pointes de lances ont été percées à partir des deux faces de la languette (Fig. 36 b) créant ainsi le profil en double biseau observé sur le bord du trou de fixation de l'objet 9051.

Les grains allongés et les macles mécaniques observés au niveau de la surface des languettes des objets 9051 et 11109 dénotent une déformation. Celle-ci pourrait être due à un ajustement pour produire une languette à section transversale rectangulaire, comme dans le cas de la pointe de lance 11109, ou d'une cassure postérieure à la production comme pour n°9051.

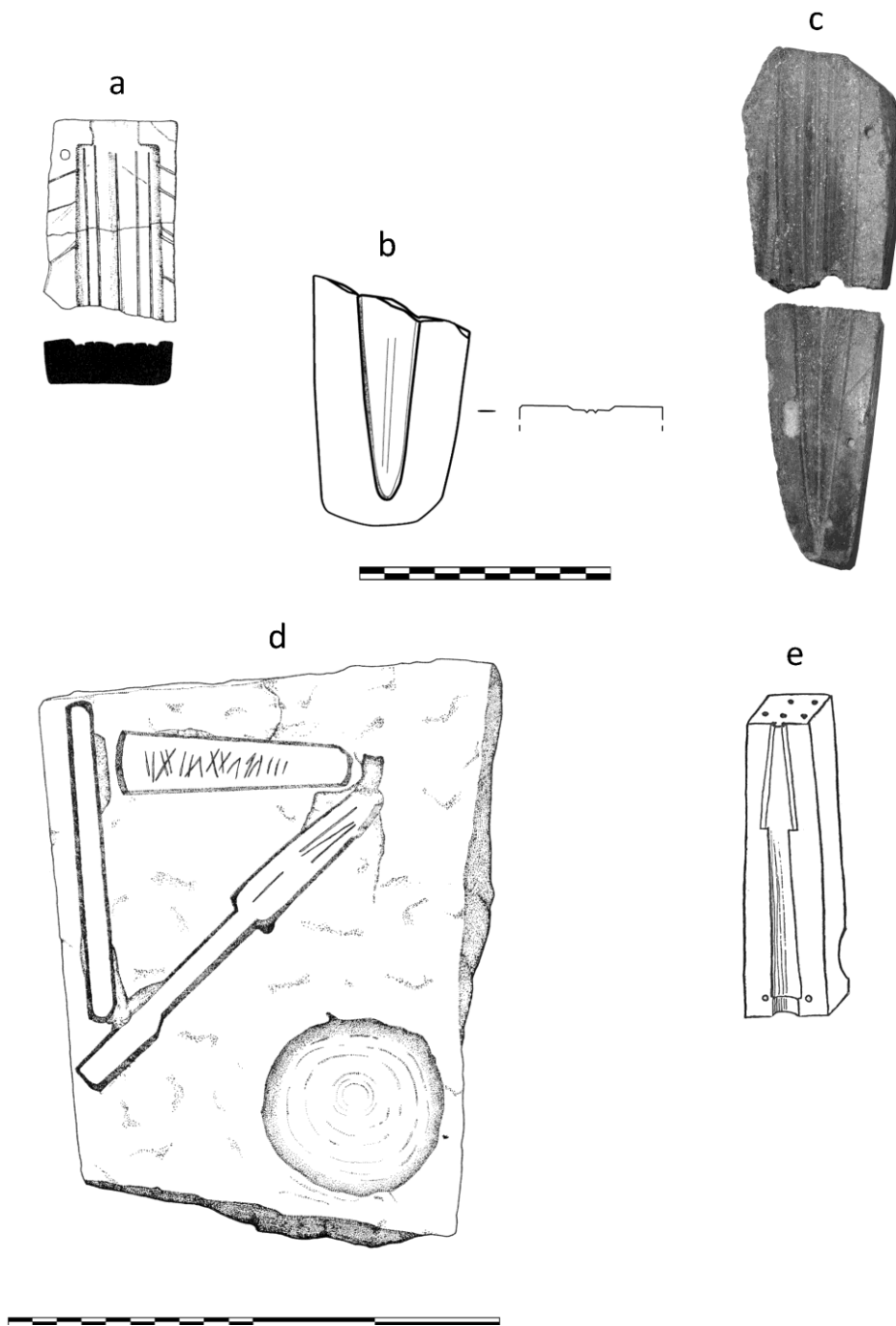


Figure 37 : a- moule de poignard à lame nervurée découvert à Tell el-Dab'a (Philip, 2006 ; 195), b- moule de poignard à lame décorée de Byblos (Dunand, 1954 ; 224), c- moule de poignard à lame décorée d'Arqa (Gernez, 2006 ; pl. 144), d- moule de Tell el-Dab'a présentant plusieurs empreintes dont celle d'une présumée pointe de lance à douille (Philip 2006 ; 174), e- moule de pointe de lance de Byblos (Dunand, 1937 ; 425).

3.1.2.4- Les pointes de lances à douille

Les pointes de lances à douille présentent généralement deux structures cristallines ayant chacune des propriétés mécaniques différentes : le tranchant présente une structure écrouie et donc dure et la douille une structure recristallisée malléable. La structure cristalline recristallisée observée sur la pointe de lame de 56064 et sur le tranchant de l'objet 10303 montre que ces deux armes n'ont pas été affûtées.

D'après l'étude de l'allongement des inclusions de sulfure de cuivre observées dans la douille nous déduisons la déformation augmente progressivement de la « zone distale » jusqu'à la « zone proximale ». Les inclusions peu allongées de forme arrondie ou ovale montrent que la « zone distale » supérieure a subi une légère déformation. Cette opération n'aurait pas entraîné un changement de forme important sur cette partie par rapport à la forme de l'ébauche obtenue par moulage.

L'orientation de l'allongement des inclusions de sulfure de cuivre nous permet de distinguer deux gestes de martelage à froid liés à deux phases de mise en forme distinctes : un martelage ayant pour but d'allonger l'ensemble de la douille et de rapprocher les deux surfaces de joint (Fig. 38 d, e). Ce geste aurait allongé les inclusions de sulfure de cuivre majoritairement selon une orientation oblique par rapport à l'axe longitudinal de l'arme. Cette opération aurait créé des irrégularités au niveau des surfaces de joint nécessitant ainsi un ajustement par un autre martelage. Cet ajustement qui s'applique sur toute la longueur des surfaces des joints aurait allongé les inclusions présentes à cet endroit selon une orientation parallèle à l'axe (Fig. 38 d).

L'étude de la structure cristalline et des inclusions de sulfure de cuivre nous a permis d'identifier les gestes du martelage utilisé dans la mise en forme de la douille. Ainsi en retraçant les différentes étapes de la mise en forme par martelage, il est possible de reconstituer la forme de l'ébauche de la douille obtenue par coulée. Celle-ci avait une forme de tronc de cône non fermé. A ce stade de la mise en forme, les deux surfaces de joints devaient avoir la forme d'un V ou d'un U (Fig. 38 b). La forme de l'ébauche exige que la douille soit martelée autour d'une barre conique au lieu d'une enclume plate. Celle-ci pourrait être en bois dur comme du buis. Des représentations d'enclumes similaires, probablement en bois (Fig. 39), ont été découvertes sur des reliefs de la tombe de Niankhkhnoum et Khnumhotep à Saqqara datant de la 5^e dynastie, ainsi que sur des reliefs de la tombe de Rekhmiré à Thebes datant de la 18^e dynastie égyptienne (Scheel, 1989 ; 18, 19). Ces enclumes étaient utilisées pour marteler de la vaisselle en métal non ferreux²⁴.

²⁴ Le terme alliage non ferreux englobe le cuivre et ses alliages, les métaux précieux et leurs alliages et tous les métaux blancs non ferreux

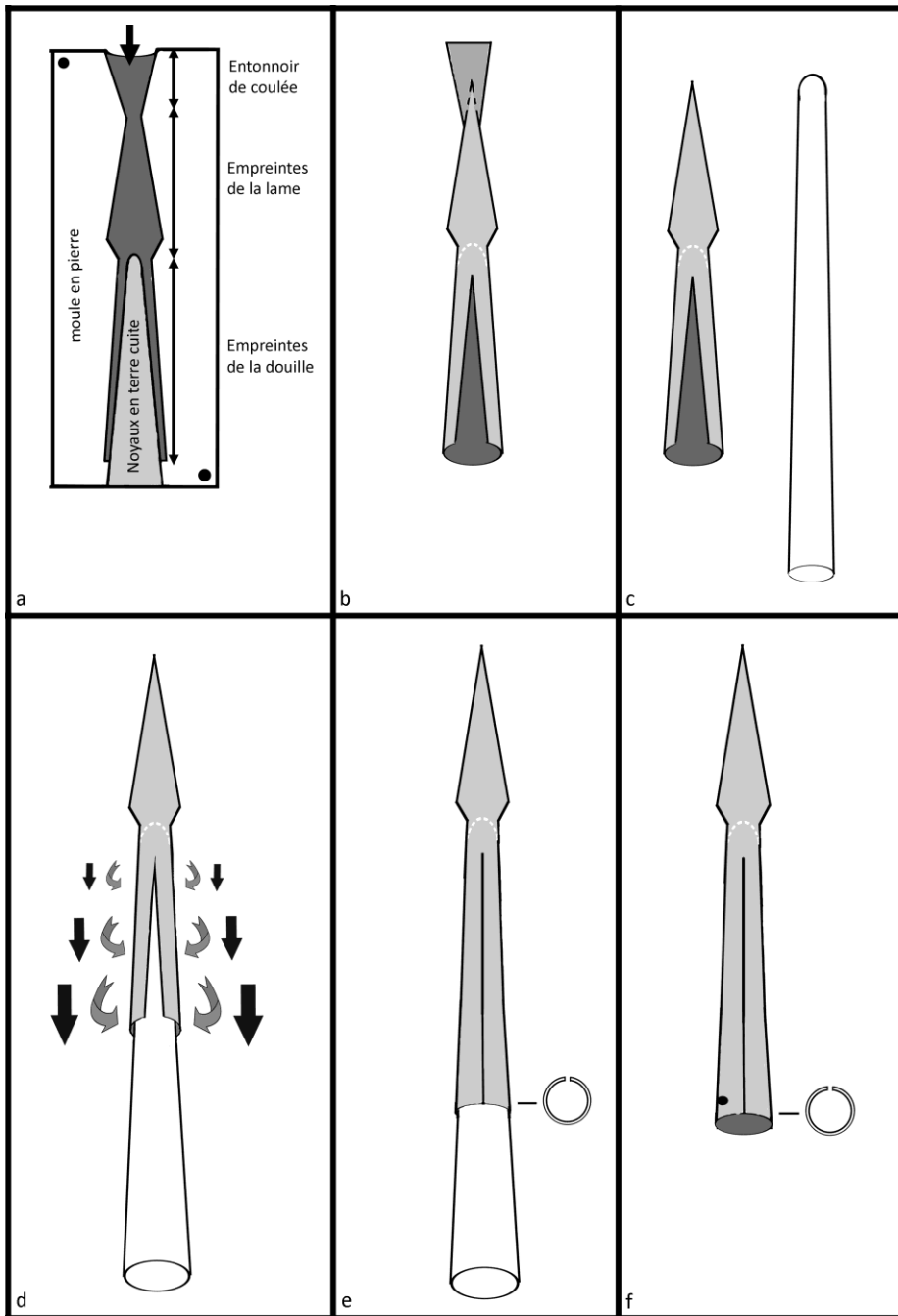


Figure 38 : schéma représentant les différentes étapes de production d'une pointe de lance à douille ; a-utilisation d'un moule à pièces multiples pour couler l'ébauche, b-la douille, au stade de l'ébauche, présente une forme tronconique avec une ouverture en V, c - après l'ébarbage et la mise en forme de la lame, la douille est martelée autour d'une enclume conique en bois, d et e- un martelage oblique est effectué pour allonger et refermer la douille, un martelage, qui leur est parallèle, est appliqué pour ajuster les surfaces de joint, une fois le martelage terminé, l'arme est polie et un trou de fixation peut être percé.

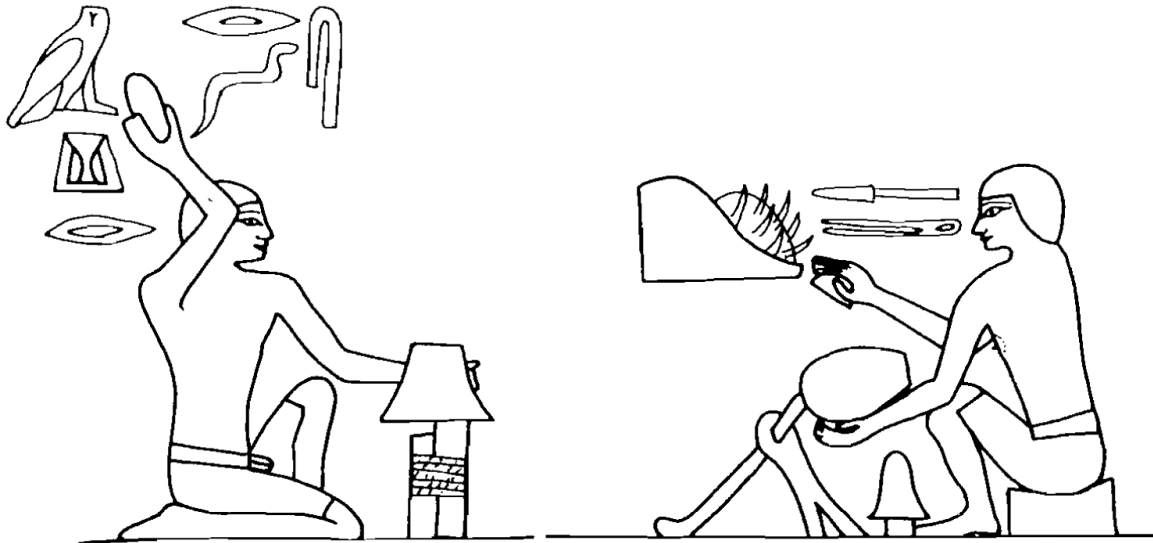


Figure 39 : A gauche, relief de la tombe de Niankhkhnum et Khnumhotep représentant un artisan battant un récipient en métal non ferreux en utilisant une enclume, probablement en bois, positionnée verticalement (Scheel, 1989 ; fig. 36, d'après Moussa et Altenmüller, 1977 ; pl. 63) ; à droite, relief de la tombe de Rekhmiré représentant un artisan travaillant un vase en métal non ferreux à l'aide d'une enclume, très certainement en bois, positionnée obliquement (Scheel, 1989 ; fig. 37, d'après Davis, 1943 ; pl. 55)

Jusqu'à présent aucune illustration satisfaisante d'un moule pouvant produire des pointes de lances à douille a été publiée. Le seul moule supposé avoir produit des pointes de lances à douille du Bronze Moyen a été découvert à Tell el-Dab'a (Bietak, 1985, Philip 1989, 2006). Il est constitué d'une matrice en pierre calcaire avec des empreintes d'un disque, d'une barre, d'une hache plate (ou ciseaux) et de la pointe de lance. D'après les illustrations disponibles (Fig. 37 d), le moule ne présente pas de canaux d'alimentation et d'évacuation, ni des trous pour fixer une deuxième pièce du moule pour créer la deuxième face de l'arme. De ce fait nous doutons qu'un moule pareil ait pu produire des pièces aussi complexes que les pointes de lances à douille. Cependant, des détails importants du moule pourraient nous échapper dans l'éventualité qu'il soit en mauvais état de conservation, ou bien si les illustrations n'ont pas reproduit fidèlement la pièce.

Pour déterminer le type de moule qui aurait pu produire ce type d'objet, il faut donc exploiter les données obtenues par les observations métallographiques. La forme de l'ébauche permet de suggérer l'utilisation soit d'un moule à pièces multiples, comme dans le cas des haches fenestrées, soit un moule pour le procédé à la cire perdue. Dans le premier cas, le moule est constitué de deux pièces produisant la forme extérieure de

l'ébauche de l'arme et un noyau en forme de cône pour produire la forme intérieure de la douille (Fig. 38 a). Une des deux premières pièces doit comporter une empreinte en relief de forme triangulaire sur laquelle vient se reposer le noyau pour créer l'ouverture en V ou en U des deux surfaces de joint. Au vu des faibles épaisseurs de l'ébauche de la douille²⁵, il est très probable que l'entonnoir de coulée soit positionné du côté de la pointe de la lame. Cette position présente plusieurs avantages techniques et sera discuté ultérieurement (partie 4.1.4)

Une pièce de moule correspondant à cette reconstitution a été trouvée à Byblos (Dunand, 1939 ; 425, fig. 312). Elle est en pierre et mesure 11 cm de long. Son contexte archéologique n'est pas défini.

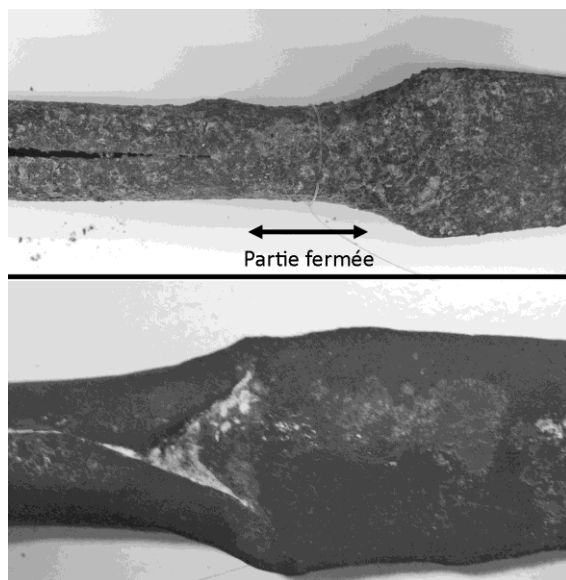


Figure 40 : Figure 10 : illustration présentant les deux formes de douilles rencontrer sur nos quatre sites. La zone distale de la plupart des pointes de lances à douille (en haut) est partiellement « fermée ». Les douilles pointes de lances 10274, 10279, 10301, 10303 (en bas), correspondant au Type 10 de Philip (1989 ; 96) présentent une forme différente du restes des pointes de lances étudiées.

Les douilles des pointes de lances 10274, 10279, 10301, 10303 (Fig. 40) ont subi une mise en forme différente du reste des pointes de lances étudiées ici. Nous pouvons conclure

²⁵ Voir les épaisseurs initiales proposées dans le tableau (2) de la section *Evaluation de la déformation*.

par simple observation à l'œil nu, que la douille a été formée par l'aplatissement et le repliement d'une partie d'une ébauche simple, en forme de parallélépipède rectangle (Fig. 41). Les gestes de martelage n'ont pu être étudiés avec précision à cause du faible nombre d'échantillons et de leur état corrodé. La présence d'inclusions allongées, riches en As et en Sb, dans une matrice recristallisée (10274, 10277, 10301 et 10303) indique qu'elles présentent un comportement proche de celui des inclusions de sulfure de cuivre ; elles se déforment plastiquement sans reprendre leur forme originelle, globulaire ou polylobée, après un traitement de recuit. Leur forme aplatie suggère qu'elles ont subi un travail de déformation multiaxial. La même constatation peut être appliquée sur les inclusions de sulfure de cuivre observées sur la pointe de lance 10279. Dans le premier cas, le geste de martelage présente une orientation préférentielle, parallèle à l'axe longitudinal. Dans le cas de n°10279, l'orientation préférentielle est oblique par rapport à l'axe. L'état fracturé des inclusions riches en As et Sb montre que la quantité de déformation appliquée devait être importante. Les inclusions riches en arsenic, découvertes dans les objets 10303 et 10277 ont été identifiées par Ruhrmann (1925) et Junk (2008) comme étant des arséniates de cuivre ($\text{Cu}_2\text{O} \cdot \text{As}_2\text{O}_5$). Celles qui sont riches en arsenic et en antimoine, étudiées à partir des objets 10301 et 10274, ont été identifiées par Keesmann et Moreno Onorato (1999) et Junk (2008 ; 33) comme étant un mélange d'arséniate de cuivre et d'antimoniote de cuivre ($4\text{Cu}_2\text{O} \cdot 3(\text{As}, \text{Sb})_2\text{O}_3$). Northover (1989), dans ses expérimentations sur le cuivre à l'arsenic, a observé des inclusions similaires. Il associe cette formation à la désoxydation du cuivre, suite à une coulée dans une atmosphère riche en oxygène.

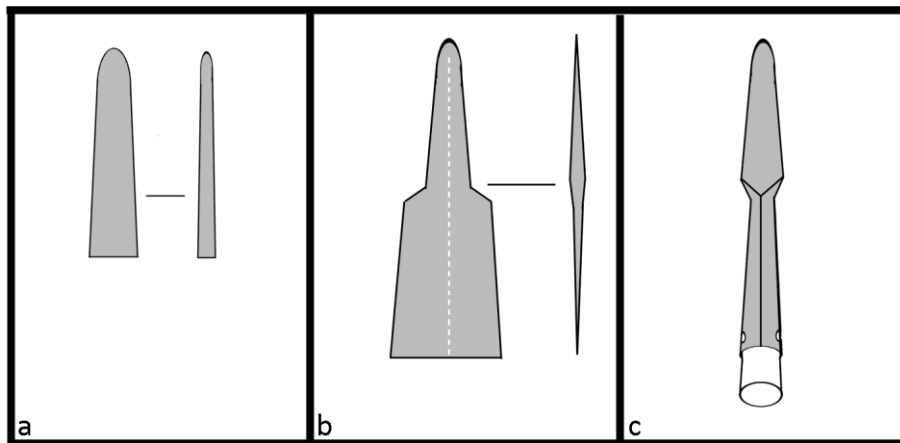


Figure 41: Figure 11 : illustration de différentes étapes de la mise en forme de la douille des pointes de lance 10274, 10279, 10301, 10303. Une partie d'une ébauche de forme simple (a) est aplatie (b) et repliée ensuite autour de la hampe ou d'une enclume cylindrique (c).

La couche argent-cuivre observée sur les douilles des pointes de lances 10976, 10977, 10982 et 10997 représente une brasure utilisée pour fixer les plaques sur les douilles. Durant ce procédé, qui s'effectue à haute température, l'alliage argent-cuivre a dû passer par un état liquide pour pouvoir adhérer au deux autres pièces. Ainsi, il n'est pas étonnant de trouver que la brasure présente une structure dendritique qui ressemble à un état brut de coulée. Selon Maryon (1912 ; 6), les alliages argent-cuivre sont utilisés comme matériau de brasure par les orfèvres et les bronziers. Ils sont généralement appliqués à une température qui dépasse 400 °C et forment des joints plus solides que les soudures. Les dimensions des brasures et la position des plaques par rapport à la douille nous permettent de proposer l'hypothèse suivante : un fil ou une bande fine d'un alliage argent-cuivre a été positionné entre la douille et les différentes plaques, ensuite tout l'ensemble a été chauffé à une température inférieure au point de fusion du métal constituant la douille et les plaques (partie 3.2.2).

La présence de nodules de seconde phase riche en étain dans les douilles de pointes de lances longues, aurait certainement rendu difficile la déformation de cette partie. Ces inclusions augmentent la fragilité et la dureté du métal. L'artisan aurait procédé à la déformation en appliquant de petites passes de martelage alternées de recuits. L'accomplissement de ce travail aurait consommé plus de temps par rapport aux autres armes.

Finalement le procédé du perçage du trou de fixation et de l'insertion du rivet semble être similaire à celui utilisé dans le cas des poignards. Dans ce cas, il est probable que le trou soit percé une fois la pointe de lance fixée sur la hampe en bois.

3.1.3- Etude des inclusions permanentes

Les inclusions permanentes rencontrées dans les objets sont celles composées de sulfure de cuivre, les nodules de plomb et les inclusions riches en arsenic et en antimoine. Ces inclusions, et à la différence des pores et des inclusions de seconde phase riche en étain, ne sont pas éliminées par la déformation et le traitement de recuit. Les inclusions de sulfure de cuivre, les nodules de plomb, les secondes phases riches en étain et les inclusions riches en arsenic et en antimoine peuvent avoir un impact néfaste plus ou moins important sur le déroulement de la déformation et du recuit. En présentant une discontinuité dans le réseau cristallin, les inclusions forment des points de concentration de contrainte durant la déformation (Dorlot *et al.* 1986 : 72, 76). Ainsi elles constituent des sites potentiels d'amorçage de fissures. L'endommagement provoqué par la création de fissures peut

conduire à une rupture du métal si des quantités importantes de déformation sont appliquées. De plus, et comme Pernot et Montheillet (1994) l'ont démontré, les inclusions comme celles de sulfure de cuivre et les nodules de plomb diminuent l'effet du recuit et donc retardent la recristallisation de la structure cristalline. Nous pouvons constater qu'un alliage cuivreux « propre », c'est-à-dire contenant très peu d'inclusions permanentes, présente un meilleur comportement durant les traitements thermomécaniques qu'un alliage « sale ». Il est donc important d'évaluer la qualité d'un alliage cuivreux en se basant sur sa propreté et pas seulement sur sa composition et d'estimer son aptitude à la déformation appliquée. Ce type de données permet de comprendre des considérations techniques qui entrent en jeu dans la détermination d'une recette d'alliage. La composition des alliages cuivreux utilisés dans les armes et leurs propriétés seront exposées dans la partie (3.2) relative aux analyses élémentaires. Dans cette partie, nous présenterons uniquement les résultats de quantification des inclusions et de l'évaluation de la quantité de déformation appliquée sur les armes. Cette étude a été effectuée sur les pointes de lances à douille du fait qu'elles présentent les sections les plus minces parmi toutes les armes du corpus et sont donc susceptibles d'avoir subi les déformations les plus importantes.

3.1.3.1- Evaluation de la déformation

La quantité de déformation appliquée sur une partie de l'objet peut être représentée par la réduction d'épaisseur de cette partie à partir de son état brut de fonderie. Pour évaluer cette réduction d'épaisseur plusieurs éléments factuels et hypothétiques doivent être considérés.

- Hypothèse 1 - Au cours d'une déformation les inclusions de sulfure de cuivre se comportent de la même façon que la matrice d'alliage cuivreux qui les entoure (Pernot, Montheillet, 1994, Pernot, 2000).
- Hypothèse 2 - Les inclusions de sulfure de cuivre sont insensibles au recuit, et donc ne changent pas de forme alors que les grains allongés disparaissent ; Les nouveaux grains recristallisé présentent une forme équiaxe (Pernot, Montheillet, 1994, Pernot, 2000).
- Hypothèse 3 - La forme d'une pièce en alliage cuivreux et des inclusions de sulfure de cuivre change au cours d'une déformation, mais leur volume reste constant (Pernot *et al.*, article à paraître).
- Hypothèse 4 - Avant d'être déformée une inclusion de sulfure de cuivre présente une forme globulaire. En association avec l'hypothèse 1, ceci implique qu'une déformation uni-

axiale conduit à inclusion en forme de cylindre. Ainsi l'élongation d'une inclusion de sulfure de cuivre peut être représentée par le facteur de forme de la section observée ; il est égal à la longueur de l'inclusion divisée par sa largeur. Une inclusion de sulfure de cuivre de forme globulaire présente donc un facteur de forme de 1.

Ces considérations nous permettent de proposer que l'allongement des inclusions de sulfure de cuivre est directement proportionnel à celui du métal déformé. Ainsi, le rapport du facteur final (f_f) sur le facteur de forme initiale (f_i) de la pièce métallique déformée est égal à celui de l'inclusion de sulfure de cuivre. Toutefois cette méthode a des limites qui rendent l'évaluation de la quantité de déformation approximative.

- 1- Bien que toutes les inclusions de sulfure de cuivre peu déformées observées dans les zones distales des douilles présentent une forme globulaire ou ovale, il a été montré que celles-ci peuvent avoir des formes polylobées comme dans le cas des haches fenestrées étroites.
- 2- La majeure partie de la douille a subi une déformation multiaxiale qui se manifeste par la présence d'inclusions de sulfure de cuivre aplaties et/ou dont les axes présentent différentes orientations²⁶.

Pour éviter cette dernière complication et simplifier le calcul de réduction d'épaisseur, nous ne considérons que la surface de joint. Cette partie de la douille a subi une déformation uniaxiale reconnaissable par l'orientation unique de l'allongement des inclusions des sulfures de cuivre qui est parallèle à l'axe de l'objet. Nous pouvons donc assimiler la déformation de cette partie de la douille au laminage d'une plaque (forme d'un parallépipède rectangulaire) en alliage cuivreux où la longueur augmente proportionnellement à la réduction d'épaisseur pendant que la largeur reste constante²⁷. Ainsi par des calculs simples, nous pouvons accéder à une formule permettant d'estimer l'épaisseur initiale de la partie étudiée :

$$V_i(L_i \times l_i \times e_i) = V_f(L_f \times l_f \times e_f)$$

²⁶ Bien que la déformation soit multiaxiale, elle présente une direction préférentielle du fait que l'axe de la majorité des inclusions de sulfure de cuivre est oblique par rapport à l'axe longitudinal de l'objet.

²⁷ Le laminage peut produire une légère augmentation dedans la largeur de la plaque. Cependant, cette modification est tellement faible qu'elle pourrait être considérée comme négligeable, surtout dans notre cas où les résultats de nos calculs ne sont qu'une estimation approximative.

Où V est le volume, L est la longueur, l est la largeur et e est l'épaisseur ; l'indice i note les valeurs initiales, l'indice f les valeurs finales. La largeur étant constante nous pouvons considérer que :

$$L_i \times e_i = L_f \times e_f \quad (a)$$

Etant donné que:

$$f_i = f_f \text{ donc } L_i/d_i = L_f/d_f \text{ ou } L_i/e_i = L_f/e_f \quad (b)$$

Où d est le diamètre de l'inclusion de sulfure de cuivre. La combinaison de la formule (a) et de la formule (b) donne :

$$e_i^2 \times f_i = e_f^2 \times f_f$$

$$e_i/e_f = (f_f/f_i)^{1/2}$$

Comme f_f/f_i de la pièce métallique est égal à f_f/f_i des inclusions de sulfure de cuivre et du fait que f_i d'une inclusion de sulfure de cuivre est égal à 1, l'épaisseur initiale de la partie étudiée peut se calculer à partir de la formule suivante :

$$e_i = e_f \times f_f^{1/2}$$

L'épaisseur initiale pourrait être calculée à partir de la mesure du facteur de forme moyen et du facteur de forme maximal (tableau 2). Le premier représente la moyenne des facteurs de forme mesurés sur toutes les inclusions de sulfure de cuivre rencontrées dans un échantillon au niveau de la surface de joint. Le second représente la mesure de l'inclusion de sulfure de cuivre présentant le facteur de forme le plus élevé. Le facteur de forme moyen ($f_f \text{ moy}$) indique alors la tendance comportementale de l'ensemble des inclusions de sulfure de cuivre. Ce procédé permet également de réduire les problèmes de sous-estimation du diamètre d'une inclusion. L'exploitation du facteur de forme maximal ($f_f \text{ max}$) peut présenter un risque plus important de sous-estimation du diamètre et donc d'une surévaluation de la réduction d'épaisseur. En effet, une inclusion de sulfure de cuivre n'est pas nécessairement observée selon une section longitudinale passant par son milieu ; dans ce cas l'inclusion n'est pas dégagée sur toute l'étendue de son diamètre. Inversement, dans le cas où l'inclusion est dégagée, le $f_f \text{ max}$ nous rapproche plus de la valeur vraie de la réduction d'épaisseur. Au vu de ces difficultés, nous avons décidé d'utiliser et de comparer les deux types de mesures.

Le facteur de forme a été mesuré dans la surface de joint de la zone distale des pointes de lances longues 10336, 11856, 27855 et 27884. Les inclusions présentes dans la

zone centrale ont été étudiées à partir de la pointe de lance longue 27856, de la pointe de lance moyenne 10978 et de deux pointes de lances courtes 10810 et 56066. La déformation totale de la zone proximale a été évaluée dans les pointes de lances courtes 10280 et 11200

La mesure du $f_{f\ moy}$ a livré des valeurs de réduction d'épaisseur ou de déformation totale assez cohérentes. Dans la zone distale, la réduction d'épaisseur varie entre 25% et 55%. Ces valeurs faibles (25 et 35%) calculées à partir de 11856 et 27884 correspondent aux observations métallographiques où entre 35 % et 50 % des inclusions de sulfure de cuivre sont arrondies. La déformation totale évaluée dans la zone centrale et proximale des pointes de lances 10280, 10810, 10978, et 27856 est approximativement de 70 %. Les mesures effectuées sur la zone centrale de 56066 et proximale de 11200 ont révélé des épaisseurs initiales (e_i) aux alentours de 900 μm pour la première pointe de lance et 600 μm pour la deuxième. Cette dernière valeur nous incite à émettre des doutes sur la qualité des mesures effectuées sur l'objet 11200 étant donné qu'il est très difficile d'obtenir des épaisseurs aussi minces par fonderie²⁸.

Les valeurs obtenues par l'utilisation du $f_{f\ max}$ sont évidemment plus élevées que celle du $f_{f\ moy}$. Comme dans le cas précédent, la déformation totale appliquée sur la zone distale est plus faible que celle appliquée sur les zones centrale et proximale. La valeur de la déformation totale, de 60 %, mesurée à partir de la zone distale de n°27884, nous semble incohérente du fait que 35 % des inclusions observées dans cette partie sont arrondies. En effet, aucune inclusion de sulfure de cuivre arrondie n'a été observée dans la zone centrale de l'objet 56066 où la réduction d'épaisseur est de 50 % selon les calculs effectués à partir du $f_{f\ max}$. Les zones centrales et distales ont livré les valeurs de déformation totale les plus élevées (80 % et 85 %). L'implication de ces valeurs sur la mise en forme des pointes de lances à douille sera discutée ultérieurement (partie 4.1.2 et 4.2.3). Finalement l'épaisseur initiale de 1100 μm calculée pour l'objet 11200 en utilisant le $f_{f\ max}$ nous semble plus vraisemblable, d'un point de vue technique, que celle obtenue par le $f_{f\ moy}$.

3.1.3.2- Quantification des inclusions

Dans le cadre de ce travail, une étude comparative de la quantité d'inclusions entre différentes pointes de lances à douille a été réalisée. Elle consiste en des traitements d'images métallographiques par un logiciel informatique permettant de calculer la surface qu'occupe l'ensemble des inclusions par rapport à la surface occupée par la matrice

²⁸ Les mesures effectuées sur les haches fenestrées montrent que les artisans étaient probablement capables de produire de telles épaisseurs par fonderie. Cependant nous n'avons pas compris ce choix risqué.

métallique. Ce type de calculs porte alors exclusivement sur deux dimensions. Ainsi, les images sélectionnées pour cette étude devaient répondre à certains critères permettant de réduire les erreurs liées à la nature de l'échantillon :

- les photos des échantillons doivent comporter exclusivement du métal sain (non corrodé) ; la corrosion entraîne une augmentation des valeurs de la surface occupée par les inclusions ;
- pour éviter le comptage des pores avec l'ensemble des inclusions, les images reproduisant des structures brutes de fonderie sont évitées ;
- les différentes dimensions (longueur, largeur, épaisseur...) d'une inclusion doivent être représentées sur une même surface et donc les images doivent présenter exclusivement des inclusions globulaire ou en forme de cylindre.

Douze pointes de lances à douille, dont cinq courtes, deux moyennes et cinq longues ont été étudiées. Les mesures montrent que les inclusions occupent 0.1 à 2.95 % de la surface des images traitées (Fig. 42). Les pointes de lances longues, 10336 exceptée, contiennent entre 0.1 et 0.5 % d'inclusions. Elles constituent le groupe le moins « sale » ce qui confirme nos observations métallographiques. Les autres pointes de lances présentent des variations plus importantes de la quantité d'inclusions. Elles ne permettent pas de discerner une relation entre le type (ou sous-type) d'arme et la qualité du métal. Cependant les pointes de lances 10977, 10997 et 10978 provenant du dépôt χ et sur lesquelles une soudure a été appliquée, présentent une cohérence au niveau de la qualité du métal ; les inclusions occupent entre 1.2 et 1.5 % de leurs matrices. En conclusion, cette étude nous a permis de distinguer deux groupes de pointes de lances où deux qualités de métal différentes ont été utilisées :

- un métal que nous pouvons qualifier de « propre » a été utilisé dans la plupart des pointes de lances à douille longue (11856, 27855, 27856 et 27884) ;
- un métal « sale », contenant principalement des inclusions de sulfure de cuivre, a été utilisé dans les pointes de lances à douille présentant une soudure sur leurs douilles et provenant du même dépôt (10977, 10978 et 10997).

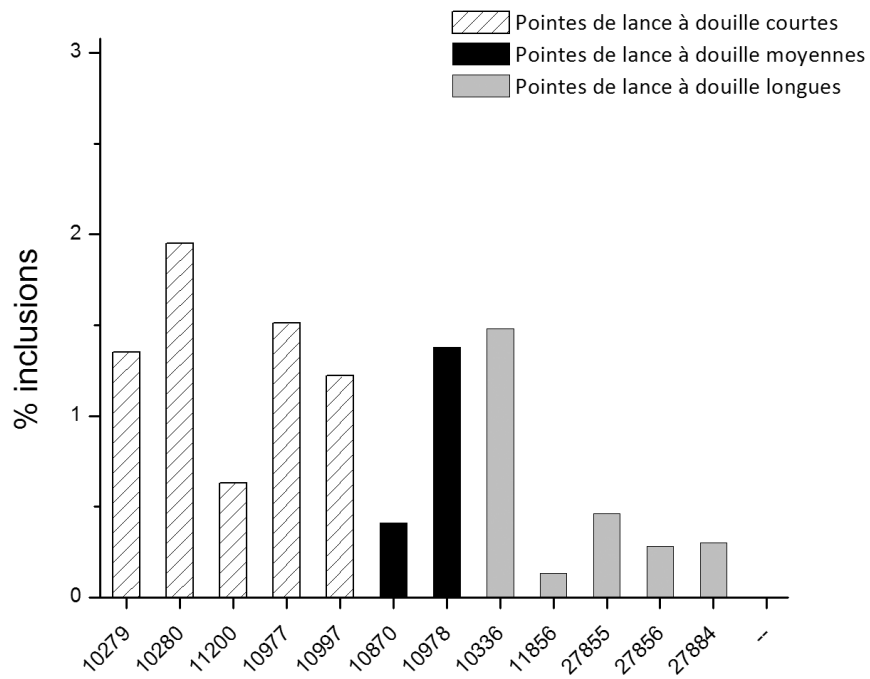


Figure 42 : illustration montrant le pourcentage d'inclusions mesurées dans pointes de lances à douille longues, moyennes et courtes.

numéro MNB	numéro de publication	zone distale			zone centrale			zone proximale			$e_{i\ moy.}$ (μm)	$e_{i\ max.}$ (μm)	réduction moyenne	réduction maximale
		e_f (μm)	$f_{f\ moy.}$	$f_{f\ max.}$	e_f (μm)	$f_{f\ moy.}$	$f_{f\ max.}$	e_f (μm)	$f_{f\ moy.}$	$f_{f\ max.}$				
10336	8441	440	5	10							984	1391	55%	70%
11856	9523	900	1.5	2							1100	1273	25%	30%
27855	9626	1000	4	10							2000	3162	50%	70%
27856	9667				600	11	39				1990	3746	70%	85%
27884	9632	1200	3	6							2078	2940	35%	60%
10978	10834				300	12	27				1039	1560	70%	80%
10810	4059				260	14	41				972	1665	75%	85%
11200	10105							260	6	18	636	1103	60%	75%
56066	f724				500	3	4				866	1000	40%	50%
10280	8291							370	11	22	1227	1735	70%	80%

Tableau 2 : résultats de la mesure du facteur de forme moyen ($f_{f\ moy.}$) et maximal ($f_{f\ max.}$) dans les zones distale, centrale et proximale. Ces mesures nous ont permis de calculer l'épaisseur initiale moyenne ($e_{i\ moy.}$) et maximale ($e_{i\ max.}$) et les réductions d'épaisseurs correspondantes.

Les numéros MNB correspondent aux numéros d'inventaire du Musée National de Beyrouth. e_f correspond à l'épaisseur de la partie étudiée de l'objet fini.

Chapitre 2

Composition des armes

3.2.1-Résultats

3.2.1.1- Les haches fenestrées

Les haches fenestrées larges analysées (annexe 1 : T.a. 8) sont toutes réalisées à partir d'alliages binaires²⁹. Dans les haches 11655, 11656 et 11658, un cuivre à l'arsenic a été utilisé (Fig. 43). Elles présentent respectivement 3, 4.6 et 3 Wt.% d'arsenic. Les alliages constituant les haches 6320, 10988 et 11708 sont des bronzes³⁰ contenant entre 6.4 Wt.% et 12.1Wt.% d'étain.

Les haches fenestrées étroites (annexe 1 : T.a. 7) présentent une grande variété d'alliages. Les haches 6273³¹ et 10794 sont en bronze (Fig. 43). Les haches 6270, 6271, 6272, 6282, 8349 et 77906 sont réalisées à partir d'alliages au plomb. Les teneurs en plomb détectées dans ces haches varient de 1.8 à 23.4 Wt.%. Les alliages au plomb de ces haches peuvent être divisés en alliages ternaires et quaternaires. Les alliages ternaires sont soit des bronzes au plomb (CuSnPb) comme ceux utilisés dans 6270 et 6271, soit du cuivre à l'arsenic avec du plomb (CuAsPb) comme dans 8349 et 77096. Les alliages quaternaires sont composés du cuivre, de l'étain, de l'arsenic et du plomb. Les haches 6281 et 6272 sont les deux seuls exemplaires à présenter ce type d'alliages. Elles contiennent des teneurs proches en arsenic et en étain situées aux alentours de 3 Wt.% (Fig. 43).

²⁹ Les alliages binaires, ternaires et quaternaires représentent des recettes contenant respectivement deux, trois et quatre ingrédients (ex. CuAs, CuSn, CuSnPb, CuSnAsPb...).

³⁰ Le terme bronze est utilisé ici pour désigner un alliage contenant uniquement du cuivre et de l'étain. Le terme alliage au plomb est utilisé ici pour désigner un alliage cuivreux (CuSn, CuAs, CuAsSn...) auquel on a délibérément ajouté du plomb.

³¹ Les haches 6270 et 6273 contiennent environ 1 Wt.% d'arsenic. Du fait des teneurs en étain élevées (respectivement 7.8 et 10 Wt.%) dans ces deux haches nous avons préféré considéré l'arsenic comme une impureté et non comme un choix d'alliage délibéré. Cette situation est en contraste avec le cas des haches 6272 et 6281 où les teneurs en arsenic et en étain sont similaires.

Les bronzes et les bronzes au plomb présentent des teneurs en étain qui varient de 4 à 10 Wt.% et les cuivres à l'arsenic au plomb contiennent entre 3 et 5.7 Wt.% d'arsenic. L'état complètement corrodé des échantillons prélevés des haches fenestrées étroites 8350, 9076 et 26759 ne permet pas d'identifier avec précision les recettes employées pour ces armes. Cependant, les analyses effectuées sur ces haches ont révélé la présence de cuivre et d'étain dans 8350 et 26759 et du cuivre, de l'étain et du plomb³² dans 9076.

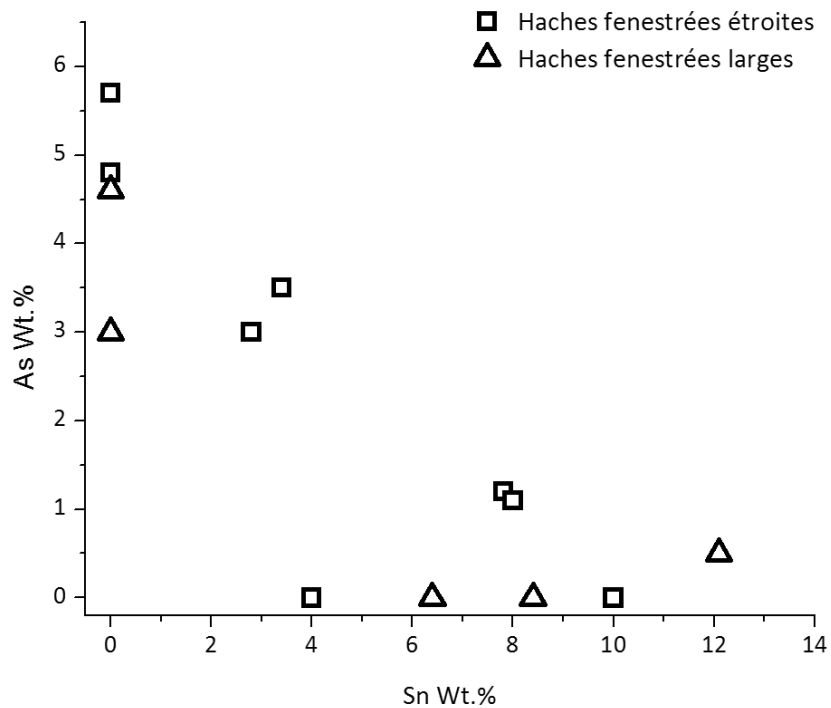


Figure 43 : Teneurs en arsenic et en étain pour des haches fenestrées.

³² Une quantité importante de nodules de plomb a aussi été observée dans 9076.

3.2.1.2- Les poignards

Les poignards simples (annexe 1 : T.a. 9) 10293, 11661, 11671 et 11854 sont réalisés à partir de cuivre à l'arsenic. Les teneurs en arsenic détectées dans ceux-ci varient de 1.2 à 7.5 Wt.% (Fig. 44). Les poignards 11686 et 27857 sont en bronze et contiennent environ 10 Wt.% d'étain. Un alliage ternaire a été utilisé dans la fabrication du poignard simple 11697. Il contient aux alentours de 2 Wt.% d'arsenic et d'étain. Le même type d'alliage contenant environ 3 Wt.% d'étain et d'arsenic a été employé pour produire le poignard à double sillon 11930 (annexe 1 : T.a. 10).

Les poignards à double nervure (annexe 1 : T.a. 10) sont tous fabriqués à partir d'alliages contenant des teneurs élevées en étain : pour les armes 9021, 27871 et 27883 sont en bronze et contiennent entre 14.4 et 15.5 Wt.% d'étain (Fig. 44). Le poignard 10309 est réalisé à partir d'un bronze au plomb présentant 10 Wt.% d'étain et à peu près 4 Wt.% de plomb. Le poignard à sillons/rainures multiples 10831 contient à peu près 4 Wt.% d'arsenic. Cependant nous ne sommes pas certains de pouvoir qualifier l'alliage comme étant du cuivre à l'arsenic du fait qu'il contienne 1.3 Wt.% d'étain, 0.9 Wt.% d'antimoine, 0.9 Wt.% de nickel. L'ensemble de ces impuretés (3.1 Wt.%) pourrait avoir un effet sur le comportement de la mise en forme, ainsi que sur la couleur et la dureté du tranchant.

Le poignard 10811 contient 1.6 Wt.% d'arsenic ainsi que 1.7 Wt.% de fer. Des teneurs relativement élevées en fer ont également été détectées dans les poignards 11671 et 11854.

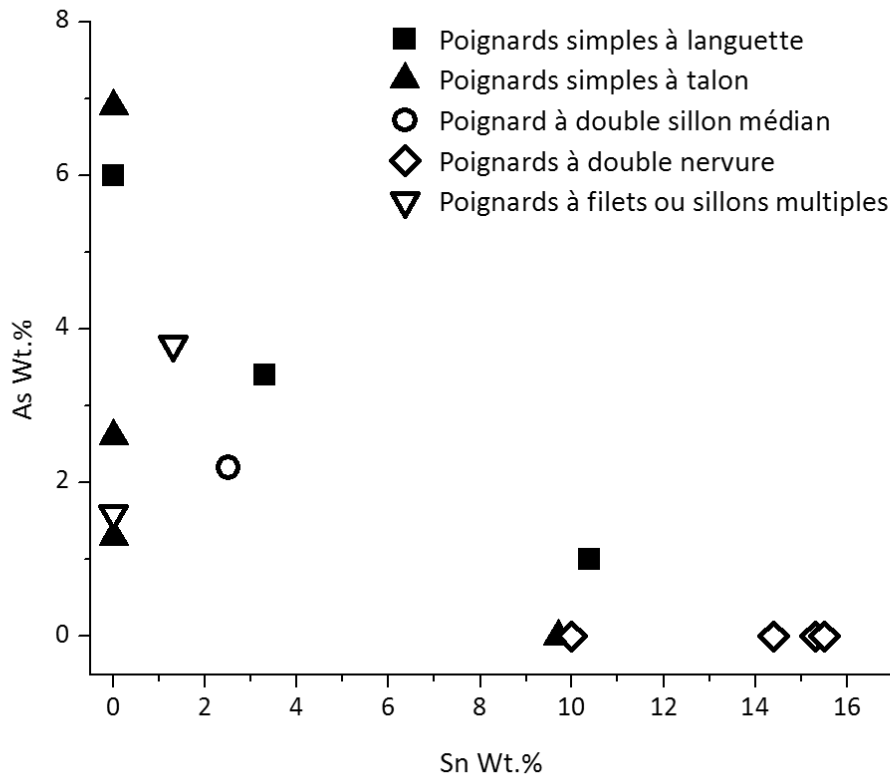


Figure 44 : Teneurs en arsenic et en étain pour des poignards.

3.2.1.3- Les pointes de lances à languette rivetée

Les pointes de lances rivetées (annexe 1 : T.a. 11) 9031, 9050, 9051, 10334, 11102, 11109, 11110 et 12329 sont fabriquées à partir de cuivre contenant entre 1.5 Wt.% et 4.3 Wt.% d'arsenic (Fig. 45). La pointe de lance 9046 est en bronze à 14.7 Wt.% d'étain. Un bronze au plomb contenant en moyenne 6.6 Wt.% d'étain et 4.8 Wt.% de plomb a été utilisé pour produire n°12320. La pointe de lance contient 11.6 Wt.% d'étain et environ 2 Wt.% de plomb.

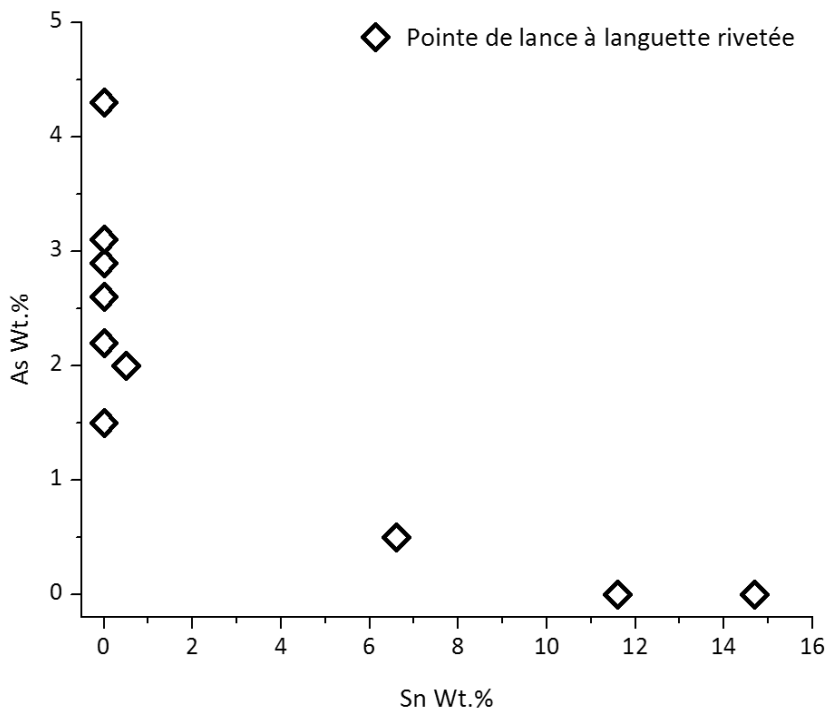


Figure 45 : Teneurs en arsenic et en étain pour des pointes de lances à languette rivetée.

3.2.1.4- Les pointes de lances à douille

Les pointes de lances à douille longues (annexe 1 : T.a. 12) sont toutes réalisées en bronze et présentent entre 11.5 et 15.4 Wt.% d'étain (Fig. 46). Les analyses montrent que la plupart de ces pointes de lances contiennent très peu d'impuretés. Les armes 10336 et 26756 constituent les seules exceptions. Les impuretés principales détectées dans la première sont le plomb (1.4 Wt.%) et l'arsenic (0.5 Wt.%). La deuxième présente à peu près 0.8 Wt.% de plomb.

Les pointes de lances à douille moyenne 10978 et 77137 (annexe 1 : T.a. 12) sont en bronze et contiennent respectivement à peu près 7 et 9 Wt.% d'étain. La pointe de lance 10870 est fabriquée à partir d'un alliage cuivreux à 1.6 Wt.% d'étain et à 1.8 Wt.% d'arsenic.

Les pointes de lances à douille courtes 10274, 10277, 10279, 10280, 10301, 10303, 10322, 10810, 11200 (annexe 1 : T.a. 13 et 14) sont fabriquées à partir d'un cuivre à l'arsenic. Les teneurs en arsenic détectées dans ces pointes de lances sont généralement comprises entre 2 et 5 Wt.% (Fig. 46). L'arme 10277 est la seule à présenter une valeur plus

élevée avec 10 Wt.% d'arsenic. Celle-ci, ainsi que les armes 10274, 10301 et 10303, présentent des inclusions riches en arsenic ou en arsenic et antimoine (annexe 2 : A.a. 2, 3 et 4). L'analyse de ces inclusions montre une grande variation au niveau des teneurs. Celles-ci sont différentes d'une arme à l'autre et parfois même au sein d'un même échantillon comme dans le cas de n°10274 (annexe 2 : A.a. 2). Le cuivre a été détecté³³ dans toutes les inclusions analysées avec des teneurs qui varient entre 10 et 70 Wt.%. Une teneur située entre 9 et 54 Wt.% d'antimoine est présent dans des inclusions des pointes de lances 10274, 10301 et 10303. Les inclusions de l'arme 10274 contiennent aussi du plomb (jusqu'à 9 Wt.%) et de nickel (jusqu'à 14 Wt.%).

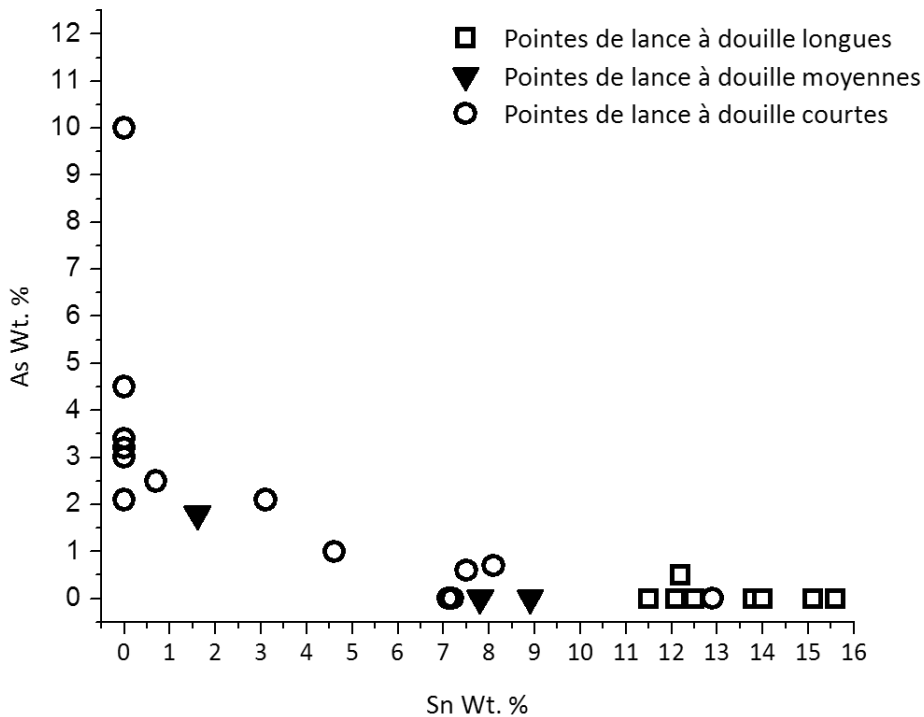


Figure 46 : Teneurs en arsenic et en étain pour des pointes de lances à douille.

³³ Les résultats d'analyses de ces inclusions ne prennent pas en compte l'oxygène qui est très probablement présent.

Les pointes de lances à douille courte 10325, 10976, 10977, 10997, 56064 et 56066 (annexe 1 : T.a. 13 et 14) sont toutes réalisées en bronze. Les armes 10325, 56064 et 56066 contiennent respectivement 12.9, 7.5 et 4.6 Wt.% d'étain. Les pointes de lances 10976, 10977 et 10997 contiennent entre 6.7 et 8.1 Wt.% d'étain (Fig. 46). Ainsi les pointes de lances à douille (10976, 10977, 10978, 10997) provenant du dépôt χ et présentant des brasures ont des compositions assez similaires. L'analyse des plaques (tableau 3) attachées aux douilles des pointes de lances 10976, 10978 et 10997 montre que ces pièces sont également fabriquées à partir d'un bronze contenant entre 7 et 8 Wt.% d'étain. Les brasures argent-cuivre (annexe 1 : T.a. 15) de 10976, 10978 et 10997 contiennent aux alentours de 60 Wt.% d'argent et 37 Wt.% de cuivre. De l'étain a été détecté dans toutes les brasures dans des teneurs qui varient entre 0.7 et 3.7 Wt.%. Une teneur de 1 Wt. % d'argent a été détectée dans les plaques de 10976 et 10978 à 150 μm au dessus de la brasure (annexe 2 : A.a. 1). Ceci montre que l'argent a bien diffusé dans les plaques.

MNB ^a	partie analysée	nb d'éch. ^b	N.A. ^c	Cu	Sn	As	Pb	Sb	Fe	S	Ni	Ag	Al
10976	Douille	2	5	92.2	7.1	<i>n.d.</i> ^d	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>
	Plaque	1	4	90.3	7.9	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	1.4	<i>n.d.</i>
10978	Douille	2	5	91.2	7.8	<i>tr</i> ^d	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>Tr</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>
	Plaque	1	4	90.8	8.1	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>Tr</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>
10997	Douille	1	2	90.5	8.1	0.7	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>Tr</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
	plaque 1	1	3	90.5	7.8	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>Tr</i>	<i>n.d.</i>	0.5	<i>n.d.</i>
	plaque 2	1	4	91.2	7.3	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>Tr</i>	<i>n.d.</i>	1.2	<i>n.d.</i>

Tableau 3: comparaison entre la composition élémentaire des plaques et des douilles des pointes de lance 10976, 10978, 10997. a- Les numéros MNB correspondent aux numéros d'inventaire du Musée National de Beyrouth. b- le nombre d'échantillons analysés ; c- le nombre d'analyses par échantillon ; d- n.d. : non détecté ; tr : teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%.

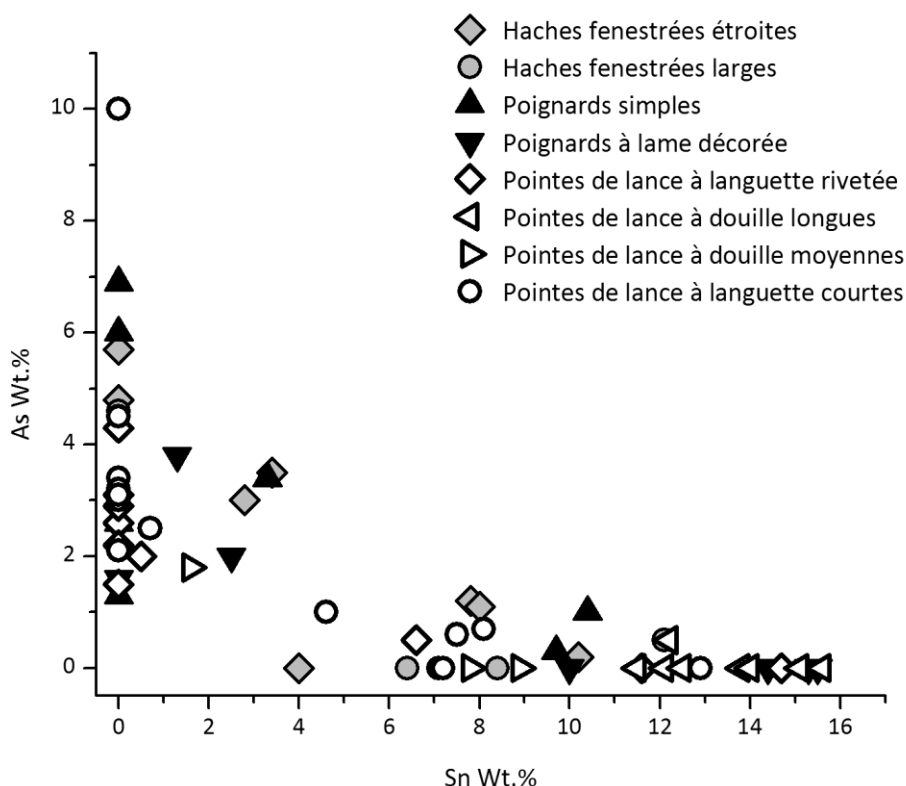


Figure 47: Teneurs en arsenic et en étain des alliages de toutes les armes du corpus.

3.2.2- Discussion

Plusieurs types d'alliage ont été utilisés à Byblos. Nous distinguons des alliages binaires comme le cuivre à l'arsenic et le bronze, des alliages ternaires comme le bronze au plomb, le cuivre à l'arsenic et au plomb, ainsi que le cuivre à l'arsenic et à l'étain et finalement des alliages quaternaires contenant du cuivre, de l'arsenic, de l'étain et du plomb.

Les analyses montrent que les principaux alliages utilisés dans ces armes sont le bronze (27 armes) et le cuivre à l'arsenic (27 armes). La majorité des objets fabriqués à partir de ce dernier alliage contiennent de 1.5 à 4 Wt.% d'arsenic (Fig. 48). Selon Lechtman (1996), un cuivre à 0.5 Wt.% d'arsenic présente des propriétés mécaniques, comme la déformabilité et la dureté, nettement supérieures à celles du cuivre non allié. De ce fait, elle désigne les alliages cuivreux dont la proportion d'arsenic est comprise entre 0,5 et 7 Wt.% par « arsenical bronze ». D'autres auteurs considèrent que ces propriétés mécaniques se

démarquent nettement de celles d'un cuivre non allié à partir d'une teneur en arsenic supérieure à 2 Wt. % (Budd et Ottaway 1989, Nothover 1989). Les expérimentations effectuées par Budd et Ottaway (1989), Northover (1989) et Lechtman (1996) montrent que le meilleur équilibre entre déformabilité et dureté est acquis entre 2 et 6 Wt.% d'arsenic. La plupart des armes en cuivre à l'arsenic de notre corpus appartient à ce domaine de teneurs en arsenic.

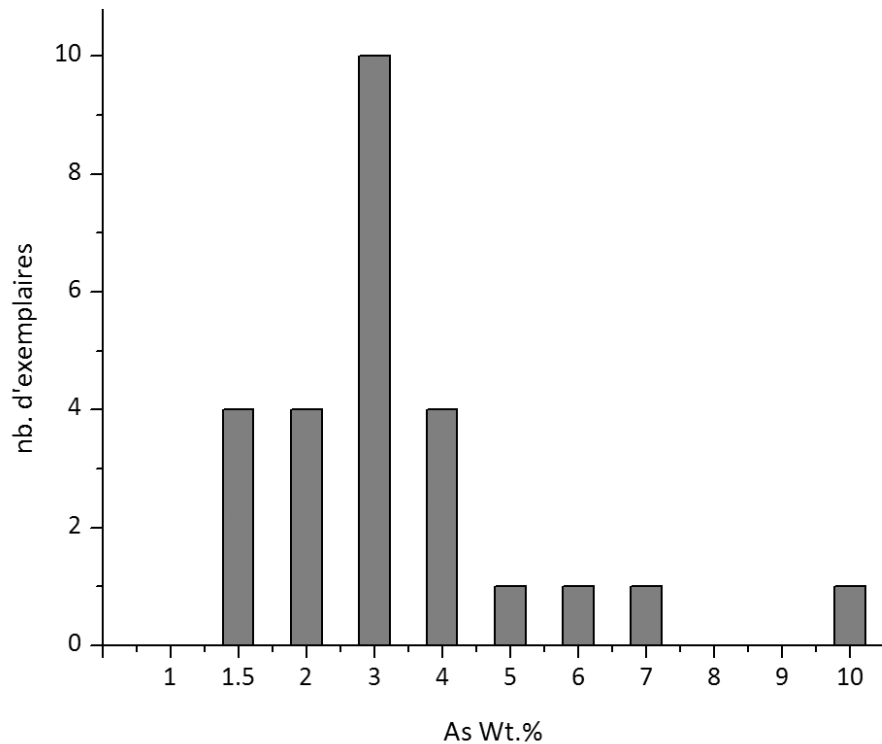


Figure 48 : Fréquence de la teneur en arsenic.

Aucune arme en cuivre à l'arsenic ne présente des teneurs d'arsenic inférieures à 1.3 Wt.% (Fig. 47). Dans les cas où de telles teneurs existent, elles sont associées à des teneurs élevées en étain comme dans le cas de n°6273, 10336, 10997, 11686, 11708. La présence de faibles teneurs en arsenic dans ces bronzes est possiblement due à un recyclage. Il est probable donc que les artisans ne considéraient pas que le cuivre à faible teneur (< 1 Wt.%) en arsenic était convenable pour la fabrication des types d'armes étudiés. Cette situation s'applique surtout aux artisans du Bronze Moyen I de Byblos. Le nombre limité d'armes étudiées ne nous autorise pas à étendre cette constatation sur les trois

autres sites. On note toutefois que les observations de Philip (2006 ; 211), basées sur ses travaux sur le site de Tell el-Dab'a, indiquent que les cuivres contenant moins de 2% d'arsenic n'ont probablement pas été distingués des cuivres non alliés.

Les résultats montrent que la plupart des armes fabriquées uniquement à partir de cuivre à l'arsenic proviennent des dépôts de Byblos. Les conclusions tirées de l'exploitation de ces résultats sont limitées à ce site durant le Bronze Moyen I. Au cours de cette période, l'utilisation du cuivre à l'arsenic semble être une pratique assez répandue, du moins au Levant sud comme à Jéricho (Khalil, 1980, 1984), Gesher (Shalev, 2009), Tell Fara (Branigan et al. 1976) et dans le Delta du Nil comme à Tell el-Dab'a (Philip, 2006 ; 211). Les objets provenant de ces sites semblent présenter des teneurs en arsenic relativement moins élevées que celles des armes de Byblos. Ces alliages dénotent probablement une continuité des pratiques du Bronze Ancien IV attestées surtout au Levant Sud³⁴ où des cuivre avec des teneurs élevées en arsenic sont fréquemment utilisés (Khalil, 1984, Philip, 1991, Philip *et al.*, 2003, Rosenfeld *et al.*, 1997, Shalev, 1989).

Le cuivre à l'arsenic a été utilisé à Byblos pour fabriquer des haches fenestrées larges, des pointes de lances à douille courtes, des pointes de lances à languette rivetée, des poignards simples à languette et à talon ainsi que des poignards à filets et rainures multiples (Fig. 47). Deux exemplaires de pointes de lances à douille courtes fabriquées à partir de cuivre à l'arsenic (1.5 et 1.6 Wt.% As) ont été découverts à Gesher au centre de la vallée du Jourdain. Une pointe de lance courte de Hazor et deux autres de Gesher (Shalev, 2009) présentent des teneurs en arsenic inférieures à 1 Wt.%. L'analyse de deux poignards simples provenant de Melaha (Moorey, Schweizer, 1972) dans le Sajur et Tarsus (Esin, 1969, Philip, 1989) en Turquie prouve qu'ils ont été réalisés à partir de cuivre à l'arsenic. Ils présentent des teneurs en arsenic de 1 et 0.9 Wt.% respectivement. Selon Philip (1989, tableau 1), ces poignards appartiennent au Type 32. Jusqu'à présent, la seule pointe à languette rivetée provient de 'Enan en Palestine. Elle est réalisée à partir d'un cuivre à 2 Wt.% d'arsenic (Stech *et al.*, 1985). Une hache fenestrée probablement de variante large provenant de Ras Shamra (Schaeffer, 1949) et une autre d'Enot Shuni en Palestine sont les deux seuls exemplaires de ce type sur lesquels des analyses élémentaires ont été effectuées. Elles sont toutes les deux faites en bronze.

Les armes en bronze étudiées présentent entre 4.6 et 15.6 Wt.% d'étain (Fig. 47). Ces résultats montrent que les bronzes à moins de 4 Wt.% d'étain ne présentent pas de

³⁴ Le manque de données analytiques sur les alliages utilisés en Syrie nous oblige à restreindre cette observation au Levant Sud. Ceci ne signifie en aucun cas que cette pratique est limitée à cette dernière région.

propriétés appréciables par les artisans. Onze des vingt-sept armes fabriquées à partir de cet alliage contiennent entre 7 et 11 Wt.% d'étain (Fig. 49). Parmi les différents bronzes (0.5 à 15.8 Wt.% Sn), les bronzes contenant entre 7 et 12 Wt.% d'étain sont les plus fluides durant la coulée (Amendola, 2010 ; 108); ils présentent le meilleur équilibre entre déformabilité et dureté (Lechtman, 1996, Piccardo *et al.*, 2004).

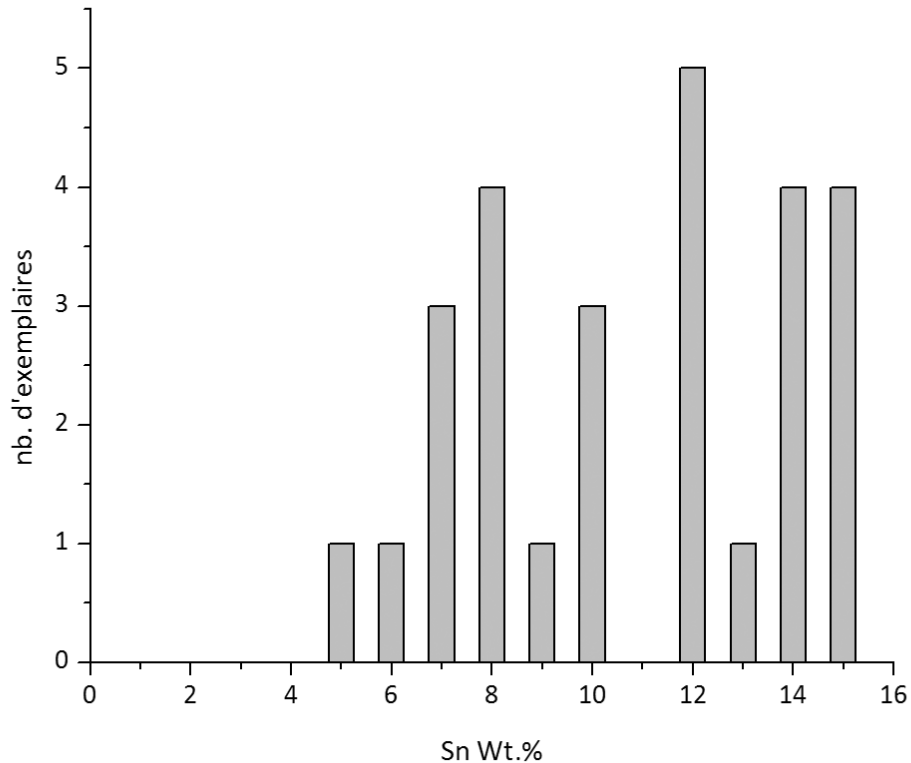


Figure 49 : Fréquence des différentes teneurs en étain mesurées.

Des bronzes contenant de 12 à 15 Wt. % d'étain ont été utilisés dans quatorze armes (Fig. 49). Celles-ci sont majoritairement des pointes de lances à douille longues et des poignards à double nervure. Ces alliages sont plus durs que les bronzes contenant 7 à 11 Wt.% d'étain. En revanche, ils sont relativement plus fragiles une fois soumis à une déformation (Lechtman, 1996, Piccardo *et al.*, 2004). Cette fragilisation est partiellement due à la formation de quantités importantes d'inclusions de secondes phases riches en étain (mélange $\alpha+\delta$) qui, au cours d'un travail de déformation, constituent des sites potentiels d'amorçage de fissure. Ces inclusions ont été observées sur plusieurs pointes de lances à

douille longues dans des structures cristallines entièrement homogénéisés³⁵. Les fissures observées sur ces pointes de lances ainsi que sur les poignards à double nervure attestent aussi de la fragilité de ces bronzes. Leurs températures de fusions basses³⁶, situées entre 965 et 995 °C (Saunders et Miodownik, 1990), pourraient constituer un facteur favorisant leur utilisation. Ainsi ces alliages permettraient d'économiser du combustible durant la fusion. Cet argument ne peut être valable que si l'artisan utilisait directement des lingots de bronze préparés à l'avance. Dans le cas contraire où l'artisan doit préparer sa recette d'alliage durant la fusion, il est obligé de fondre le cuivre d'abord, et devra donc monter à des températures plus hautes que 1085°C (Saunders et Miodownik, 1990), pour ensuite ajouter l'étain. L'artisan pourrait fondre son cuivre d'une manière plus rapide en ajoutant des fragments d'alliages cuivreux (CuAs, CuSn, CuSnPb, CuSnAs...) qui faciliteront le déclenchement du processus de fusion. Cependant, l'ajout de métal de recyclage à la recette originelle est peu probable dans le cas des pointes de lances à douille longues et les poignards à double nervure étant donné leurs faibles teneurs en impuretés (annexe 1 : T.a. 10 et 12) et leur propreté.

Le bronze apparaît au Levant durant la deuxième moitié du 3^e millénaire (Khalil, 1980, Moorey et Schweizer, 1972, Richard, 2006, Stech *et al.*, 1985). Les analyses élémentaires effectuées jusqu'à présent semblent indiquer que son usage ne devient courant qu'à la fin de ce millénaire ou au début du 2^e millénaire (Branigan *et al.*, 1976, Moorey et Schweizer, 1972, Philip, 1991, Rosenfeld *et al.*, 1996, Shalev, 2009, Schaeffer, 1949). Philip (2006 ; 214) a remarqué une baisse de la teneur en étain dans les objets du Bronze Moyen II de Tell el-Dab'a. Ce changement, pourrait s'appliquer aux armes que nous avons étudiées : les armes de Byblos et d'Arqa appartenant au Bronze Moyen I présentent des teneurs en étain élevées (6.4 à 15.6 Wt.%), en revanche les objets de Khariji, probablement du Bronze Moyen II, présentent des teneurs en étain moins élevées (4.6 à 7.5 Wt.%). Cependant, le nombre d'objets analysés de Khariji et leurs datations imprécises ne nous permettent pas de confirmer cette proposition. Toutefois, il est probablement préférable de ne pas considérer les armes du Bronze Moyen I et celles qui sont possiblement du Bronze Moyen II comme un seul ensemble.

Les analyses élémentaires montrent que le bronze a été utilisé dans la fabrication de tous les types d'armes. En dehors des sites étudiés ici, des exemplaires de haches fenestrées étroites en bronze (6 à 15 Wt.% Sn) ont été découvertes à Aphek (Shalev, 2000, 2009), à Ain es-Samiyeh (Philip, 1989), à Tell el-Dab'a (Philip, 2006 ; 211), à Hama (Philip, 1991). Les analyses effectuées sur les haches fenestrées larges de Ras Shamra (Schaeffer,

³⁵ Le travail de déformation et les traitements de recuit éliminent ces inclusions et homogénéisent l'alliage.

³⁶ La température de fusion est quasiment inversement proportionnelle à la teneur en étain (annexe 3 : ill. 2)

1949) et d'Enot Shuni (Caspi *et al.*, 2010) ont révélé des teneurs en étain de 9.8 et 5.5 Wt. % respectivement. Des poignards à lame simple en bronze de Meggido, appartenant au Type 30 de Philip (1989), contiennent environ 10 Wt.% d'étain. La seule pointe de lance à douille longue analysée provient de Tell el-Dab'a. Elle est réalisée à partir d'un bronze à 12.3 Wt.% d'étain. Des pointes de lances à douille courtes fabriquées en bronze contenant entre 2 et 11 Wt.% d'étain ont été trouvées à Ebla (Palmieri, Hauptmann, 2000), Gesher, Fasuta, Aphek (Shalev, 2009), Meggido (Philip 1989 ; 516, d'après Guy, 1938), Khirbet Iskandar en Transjordanie (Richard, 2006) et à Tell el-Dab'a (Philip 2006 ; 212-213).

Les observations métallographiques et les analyses élémentaires montrent qu'une grande partie des armes de notre corpus contiennent du plomb. Dans la plupart des cas, la teneur en plomb est inférieure à 1 Wt.%. Six haches fenestrées étroites, un poignard à double nervure et deux pointes de lances à languette rivetée présentent des teneurs importantes en plomb qui varient de 2.2 à 23.3 Wt.% (Fig.50).

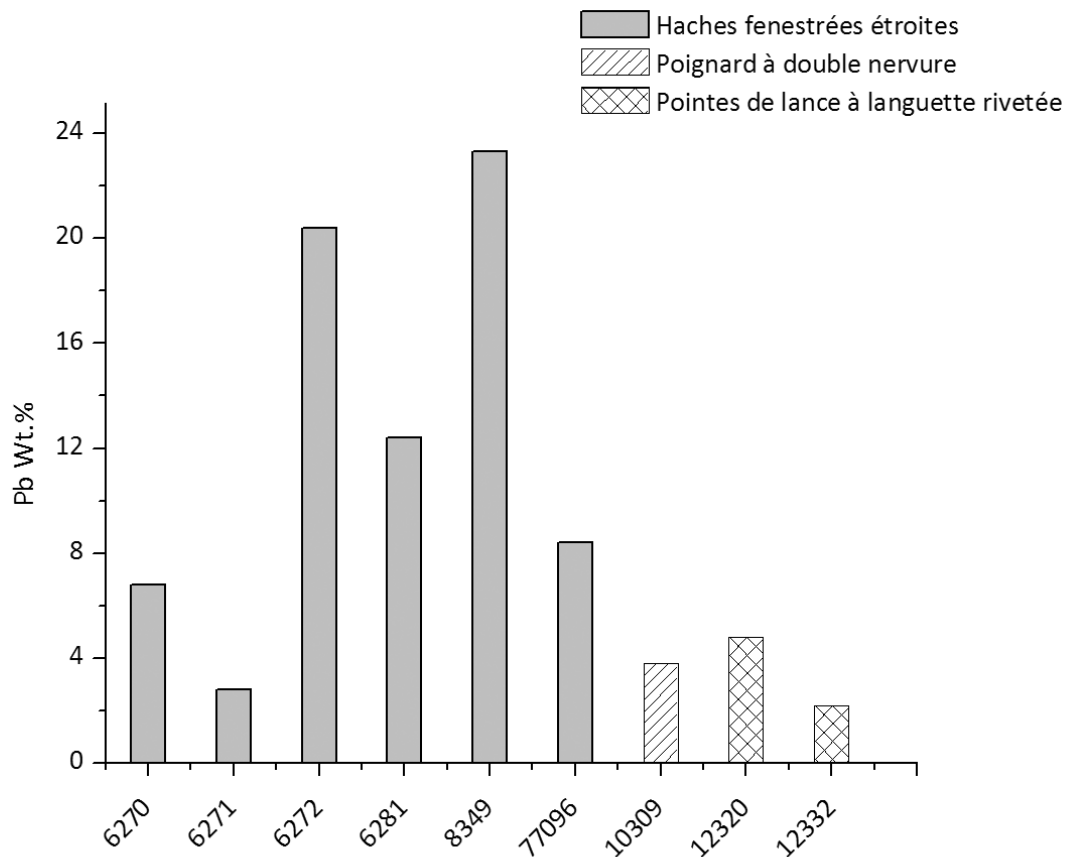


Figure 50 : Teneurs en plomb des objets considérés comme étant faits à partir d'un alliage au plomb.

Le plomb est immiscible dans les alliages cuivreux. Il forme dans la matrice cuivreuse des phases riches en plomb de forme globulaire. Au cours de la déformation, ces nodules forment des sites potentiels d'amorçage de fissures (Pernot, 2000). A la différence des inclusions de secondes phases riches en étain, ces nodules ne sont pas éliminés par les passes de déformation et de recuit. De surcroît, au cours de ce type de travail de mise en forme, les nodules de plomb se cristallisent de nouveau à chaque recuit et redeviennent donc globulaires. Les nodules de plomb constituent donc un risque de rupture constant tout au long du travail de déformation. De ce fait, les alliages au plomb ne sont pas appropriés au travail de déformation. L'utilisation des alliages au plomb dans les haches fenestrées étroites, dont la mise en forme requiert peu de déformation, est donc bien justifiée. Les alliages au plomb (CuSnPb, CuAsPb, CuAsSnPb) sont souvent utilisés dans les haches fenestrées étroites et sont quasiment absents des autres armes du Bronze Moyen I comme les pointes de lances à douille et les poignards à lame simple³⁷ (Philip, 1989 ; 515-516, Shalev, 2009, Palmieri, Hauptmann, 2000). Ces données montrent que les artisans du Bronze Moyen I connaissaient le comportement de ces alliages sous des conditions de déformation. Il est probable que le plomb détecté dans ces haches soit le résultat d'un ajout volontaire ou d'une utilisation sélective des alliages au plomb. L'utilisation des alliages au plomb dans des figurines du Bronze Moyen (Rosenfeld *et al.*, 1997) mises en forme par fonderie semble confirmer nos observations. En revanche, la présence de 2.2 à 4.8 Wt.% de plomb dans les pointes de lances à languette rivetée et dans le poignard à double nervure, partiellement mises en forme par déformation, est problématique.

L'utilisation des alliages au plomb dans ces armes ne présente aucun avantage technique dans le sens où il n'améliore pas la mise en forme par coulée ou par déformation plastique : les travaux d'Amendola (2010 ; 118) ont montré qu'à partir de 5 Wt.% de plomb, la fluidité d'un bronze au plomb décroît. Or, cinq des sept haches fenestrées étroites présentent des teneurs de plomb supérieures à 6 Wt.%. De plus, trois des onze haches fenestrées étroites étudiées ne sont pas faites à partir d'un alliage au plomb ce qui montre que l'ajout de plomb n'est pas essentiel à la réussite de la coulée de ces armes. Ceci s'applique aussi aux poignards à double nervure et aux pointes de lances à languette rivetée dont la plupart des exemplaires sont fabriqués à partir de bronze ou de cuivre à l'arsenic.

Outre Byblos et Yanouh, des haches fenestrées étroites réalisées à partir d'alliages cuivreux au plomb ont été découvertes à Hama (Philip, 1991), Ebla (Palmieri, Hauptmann, 2000), Tel Rehov, Kurdani (Schenberg, 1985), Aphek et Gesher (Shalev, 2009). Ainsi,

³⁷ Comme nous l'avons montré par les observations métallographiques, ces armes subissent des quantités importantes de déformation au cours de leur mise en forme.

quatorze des vingt-cinq haches fenestrées étroites analysées sur l'ensemble du Levant sont produites à partir du même type d'alliage.

Les propriétés des alliages CuAsSn utilisés dans les armes 10870, 11697, 11930 sont mal connues. Il est difficile de déterminer si ces alliages sont des recettes conçues par l'artisan ou si elles résultent d'un mélange aléatoire de plusieurs alliages. Le premier cas de figure nous semble vraisemblable au vue de la similitude des proportions d'arsenic et d'étain³⁸ détectées dans ces trois armes. Cependant la rareté des armes réalisées à partir de cet alliage par rapport à l'ensemble de notre corpus ne nous permet pas de confirmer ce propos. Byblos n'est pas le seul cas où ces alliages ont été utilisés : les analyses montrent qu'ils l'ont été dans des pointes de lances à douille et des poignards provenant de Gesher (Shalev, 2009), Tel Rehov (Shenberg, 1985), Jericho (Khalil, 1980 ; 94-96), Tel el-Dab'a (Philip, 2006 ; 210).

La détermination de la composition des pointes de lances à douille 10976, 10978, 10997, des plaques qui entourent leurs douilles et des brasures³⁹ fournissent des informations supplémentaires concernant la méthode d'application de la brasure partiellement dévoilée par les observations métallographiques (partie 3.1.2.4) : les pointes de lances et plaques sont toutes réalisées à partir d'un bronze à 7 et 8 Wt.% d'étain. La température⁴⁰ à laquelle elles commencent à fondre est située entre 900 et 910 °C (Saunders et Miodownik, 1990). L'alliage argent-cuivre employé fond complètement entre 810 et 830 °C⁴¹ (Subramanian et Perepezko, 1993). La fusion de l'alliage argent-cuivre⁴² située entre la plaque et la douille en bronze pourrait présenter des risques à cause du faible écart avec les températures de fusion des différents éléments. Le brasage est donc un processus délicat qui demande un contrôle rigoureux du temps et de la température de chauffage nécessaires à la fusion de l'alliage cuivre-argent et à son adhésion à la plaque et à la douille. Un artisan expérimenté peu contrôler la température du métal par sa couleur. A chaque domaine de température de chauffe correspond en effet une couleur. Selon Fluzin

³⁸ Dans la plupart des autres armes (6273, 6320, 10336, 10279, 10325, 10810, 10978, 10997, 11102, 11110, 11686, 11708, 26756, 27857, 56064, 56066), les teneurs en arsenic et en étain présentent toujours un écart important.

³⁹ Les brasures seront considérées comme étant en alliage d'argent et de cuivre uniquement. Nous ne sommes pas en mesure de déterminer si les faibles teneurs en étain proviennent de la recette de la brasure même ou d'une diffusion à partir de la plaque et de la douille en bronze.

⁴⁰ C'est la température à laquelle le métal se solidifie complètement durant le refroidissement. Elle correspond au solidus du diagramme de phases (annexe 3 : ill. 2).

⁴¹ La température du liquidus (annexe 3 : ill. 3).

⁴² Il ne faut pas écarter la possibilité que la brasure soit uniquement constituée d'argent. Dans ce cas, le cuivre détecté dans la brasure aurait diffusé à partir du bronze constituant l'arme et les plaques.

(1983), le métal chauffé entre 800 et 850 °C présente une couleur qui varie du « rouge cerise claire » au « rouge clair ». A 900 °C, la couleur du métal vire vers le « rouge jaunâtre ».

A notre connaissance, aucune brasure n'a été trouvée sur des objets en alliages cuivreux du Bronze Moyen ou des périodes plus anciennes au Levant. Pourtant, ce processus semble être pratiqué au moins dès le 27^e siècle av. J.-C. en Egypte et en Mésopotamie. D'après Lucas (1948 ; 248), une brasure, probablement en argent et possiblement en cuivre⁴³, a été utilisée pour joindre différentes pièces en cuivre d'un baldaquin. Celui-ci a été trouvé dans la tombe de Hétep-Hérès de la 4^e dynastie. L'utilisation de l'or, de l'argent et du cuivre dans les brasures est attestée aussi sur des objets appartenant à la 12^e dynastie (Maryon, 1941, Scheel, 1989 ; 35-36). Ogden (1992, 52) a mis au jour l'utilisation d'une brasure en alliage à base d'argent sur les granulations d'un objet provenant de l'Egypte et daté du premier quart du 2^e millénaire. La technique de granulation semble avoir été introduite dans l'Egypte durant cette période (Ogden, 2009 ; 165). Selon Maryon (1948), des brasures ont été utilisées sur des objets en or et en argent découverts au cimetière royal d'Ur (Woolley, 1934, Zettler, Horne, 1998), daté du 27^e siècle av. J.-C. Les analyses effectuées par Craddock (1984) montrent qu'une soudure en étain a été utilisée pour attacher des anses en argent à des vaisselles en cuivre découvertes dans le même cimetière. Une brasure en alliage argent-cuivre-étain a été trouvée sur une hache qui date de la troisième Dynastie Archaique (c.2600-2340 av. J.-C.) provenant d'Ur (Moorey, 1994, Roberts, 1974).

⁴³ La présence du cuivre dans cet alliage n'est pas confirmée mais, selon l'auteur, ne peut pas être exclue (Lucas, 1948; 248).

Chapitre 3

Simulations expérimentales

3.3- Introduction

L'observation métallographique de la structure cristalline des échantillons représentant les différentes parties d'une arme a permis de déterminer les traitements thermiques et mécaniques qui ont été appliqués sur chacun des objets étudiés. En particulier, l'étude de l'élongation et de l'orientation des inclusions, comme les sulfures de cuivre, a autorisé l'évaluation de la quantité de travail qu'a subie chaque partie de l'objet. Ainsi à partir de l'étude d'objets finis, différentes phases de la mise en forme de chaque type d'objets ont pu être identifiées et des modèles du processus complet de la fabrication de certaines armes ont été proposés. Pour vérifier la validité des modèles de mise en forme des pointes de lances à douille et des haches fenestrées, des simulations expérimentales ont été entreprises (Fig. 51). Ces expérimentations avaient plusieurs objectifs.

- 1- Fabriquer des moules de pointe de lance à douille⁴⁴ en se basant sur le modèle de mise en forme proposé dans la partie 3.1.2.4, pour couler éventuellement l'ébauche en alliage cuivreux qui aurait servi comme point de départ pour le travail de déformation. L'importance de cette expérimentation émane du fait qu'aucun moule, ni ébauche de pointe de lance à douille, dont l'appartenance au Bronze Moyen est certaine, n'a été retrouvé jusqu'à présent. Il est donc essentiel d'utiliser ce procédé pour proposer et vérifier des processus de fabrication ayant probablement été utilisés par les artisans à cette époque.
- 2- Vérifier la possibilité d'utilisation des moules en pierre tendre, comme la stéatite, pour couler des alliages cuivreux dont la température de fusion dépasse 800 °C. Ainsi il est possible de déterminer si ces moules ont servi à couler l'objet

⁴⁴ Les pointes de lances 10274, 10279, 10301 et 10303 appartenant au Type 10 de Philip (1989; 96) sont exclues de ces considérations parce qu'elles ont été mises en forme par un procédé différent.

- lui-même et pas seulement son modèle en cire utilisé pour la fabrication de moules en terre.
- 3- Essayer de retrouver une partie du savoir-faire mis en œuvre par les artisans durant la fabrication d'un moule en pierre tendre et / ou en terre cuite et durant la coulée des armes, ainsi que déterminer des difficultés éventuelles rencontrées par un artisan durant ces deux phases.

Les expérimentations entreprises peuvent être divisées en trois phases successives. Les deux premières ont été réalisées au laboratoire IRAMAT-CRPAA à Bordeaux. La troisième s'est déroulée, sous la supervision de N. Thomas (INRAP), dans une aire d'archéologie expérimentale à Barys en Belgique. La première partie a consisté à créer des modèles d'armes en cire pour ensuite fabriquer des moules en terre et pour une vérification préliminaire des modèles de mise en forme proposés. Durant la seconde partie, des moules en pierre tendre et des moules en terre ont été fabriqués. Ce dernier type de moule a été obtenu par le procédé de la cire perdue. Finalement, la troisième partie a porté sur la recreation des ébauches des pointes de lances à douille et des haches fenestrées par coulée de différentes recettes d'alliages cuivreux.

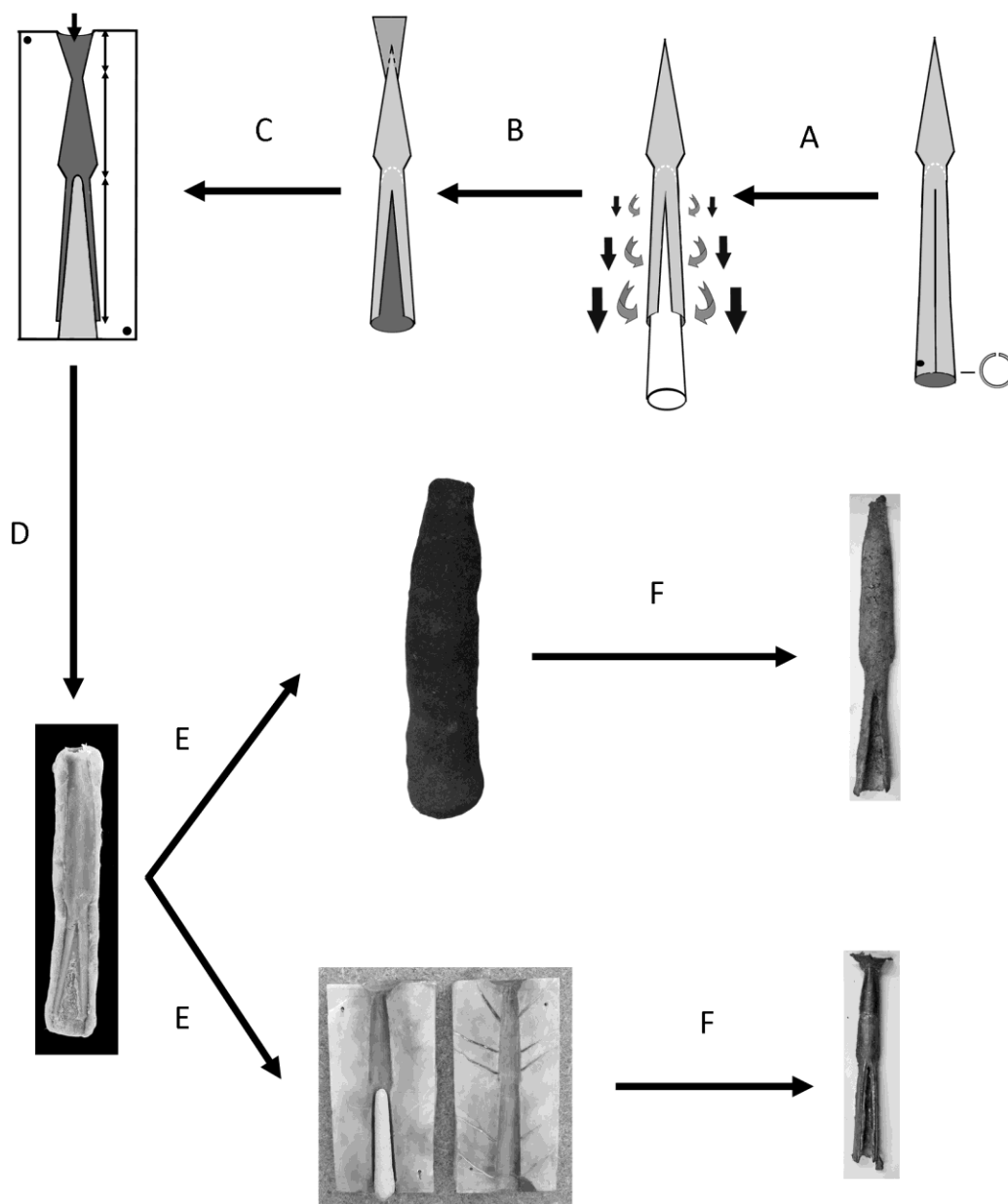


Figure 51 : schéma représentant la méthodologie adoptée pour déterminer le processus de fabrication des pointes de lances à douille : l'étude de l'objet fini (A) par métallographie permet de déterminer les traitements thermiques et mécaniques ainsi que la quantité et l'orientation des déformations appliquées sur cet objet (B). Ainsi la forme de l'ébauche de la pointe de lance est identifiée (C) et le type du moule peut être estimé. Pour vérifier la validité de ce modèle, des recreations sont produites à partir de l'ébauche en cire (D) et ensuite en alliage cuivreux (F) par l'utilisation de moules en terre cuite (E haut) ainsi que de moules en pierre (E bas).

3.3.1- Fabrication des modèles en cire dans des moules en terre crue

Pour simuler la coulée des ébauches des armes en alliages cuivreux, il était nécessaire de mettre en œuvre un procédé similaire avec de la cire d'abeille. Ainsi, pour recréer des modèles en cire représentant des ébauches de haches fenestrées larges, de haches fenestrées étroites et de pointes de lances à douille large, trois moules en terre ont été fabriqués. Ces trois moules, produisant chacun un type d'arme différents, sont constitués de deux pièces présentant des empreintes pour créer la forme externe de l'ébauche et un noyau pour créer la forme intérieure, voir le vide, du collet ou de la douille. Pour créer ces moules, un modèle de chaque type d'ébauche a été modelé et sculpté dans une argile à dégraissant fin (Fig. 52 A). Chacun de ces modèles présentait la forme de l'ébauche dans laquelle est intégré le noyau du moule. Une fois le modèle séché, une couche épaisse de la même argile a été appliquée sur la totalité de sa surface. Cette couche a ensuite été coupée longitudinalement en deux parties qui ont été retirées séparément du modèle en argile. Ainsi chacune de ces deux parties en terre présentait l'empreinte d'une face du modèle en argile. Ces deux parties constituaient les deux pièces du moule donnant la forme extérieure de l'ébauche, l'entonnoir de coulée et les parties destinées à fixer le noyau dans le moule. Cependant un retrait de l'argile a été constaté durant le séchage de ces deux parties du moule. Ce retrait de l'argile a conduit à la modification des dimensions des empreintes du moule. Par conséquent les modèles en cire produits par ces moules n'avaient pas les mêmes dimensions que les modèles en terre. Une fois le séchage des deux pièces terminé, des noyaux en argile ont été moulés puis séchés (Fig. 52 B).

Pour éviter l'accrochage de la cire d'abeille sur le moule en terre, les empreintes du moules et le noyau ont été enduits d'une couche de graisse de mouton. Cette couche fine joue le rôle de démoulant en évitant un contact direct entre le moule et la cire. Une fois cette couche appliquée, le moule a été assemblé et positionné dans un angle variant entre 85° et 75° avec la verticale. Cette position inclinée a été choisie pour favoriser l'échappement des gaz au cours de la coulée. Ceux-ci peuvent être produits durant le moulage de la cire. La température de fusion de la cire étant aux alentours de 65 °C, les températures de coulée de la cire étaient soit entre 90 °C et 100 °C, soit entre 110 °C et 130 °C.

Treize modèles en cire, dont six correspondent aux haches fenestrées étroites, quatre aux haches fenestrées larges et cinq aux pointes de lances à douille longues, ont été coulés (Fig. 52 C). Pour toutes ces coulées, la cire d'abeille a convenablement rempli les empreintes du moule même dans les parties présentant des épaisseurs voisines de 1 mm.

Cependant, plusieurs défauts dans les modèles en cire ont été détectés. Ils sont liés à des défauts dans la morphologie du moule ou à la température de coulée.



Figure 52 : A partir d'un modèle en argile (A), un moule permanent a été réalisé en utilisant de l'argile (B). Il est constitué de deux pièces créant la forme extérieure du modèle (B au centre et à gauche) et un noyau (B à droite). Ce moule a servi à la coulée des modèles en cire (C).

Le premier type de défauts consiste en des « vides » et des fissures (Fig. 53 A) présents dans les parties fines des modèles en cire comme les parties minces des douilles. La formation de ces défauts est probablement due à l'irrégularité de l'évolution de l'épaisseur de l'empreinte de la douille. Celle-ci devrait s'amincir progressivement de la zone distale jusqu'à la zone proximale. L'irrégularité de l'épaisseur des empreintes de douille mène à la création des îlots d'empreintes minces entourées d'îlots plus épais. Ainsi durant et après la coulée, le refroidissement entraîne un retrait de la cire des îlots minces

vers les îlots plus épais. Ce rétrécissement pourrait alors créer des fissures ou des trous dans la douille au niveau des îlots minces.

Le deuxième type est présent au niveau de l'entonnoir et de la lame. Il s'agit de grands creux (Fig. 53 B) qui traversent l'entonnoir sur toute sa longueur. L'ouverture des creux est située en toute logique sur le sommet de l'entonnoir. Le troisième type représente des trous (Fig. 53 C) situés dans les parties épaisses, comme la lame et l'entonnoir, semblables aux trous de fonderie rencontrés dans les pièces en alliages cuivreux. Ces deux derniers types de défauts ont surtout été remarqués pour les modèles dont la température de coulée de la cire était comprise entre 110 °C et 130 °C. Entre ces températures, la cire liquide peut se dilater considérablement et solubiliser une grande quantité de gaz. Durant le refroidissement (entre 10 et 15 minutes), l'évacuation des gaz peut produire des trous. Le creux dans les entonnoirs est probablement aussi la conséquence de ce dernier processus et du retrait important de la cire. Ces deux processus réduisent le volume du modèle coulé, surtout au niveau des parties qui se solidifient en dernier comme l'entonnoir et la lame puisqu'ils présentent les plus grands volumes de matière.



Figure 53 : A- fissuration dans les parties minces d'une douille de pointe de lance en cire. B-creux traversant l'entonnoir du modèle de hache fenestrée étroite en cire. C- trou situé dans la lame du modèle de hache fenestrée étroite en cire.

La présence des défauts et des irrégularités dans les épaisseurs des parties fines a exigé la réparation des modèles en cire avant de procéder à la fabrication des moules en terre pour la coulée du métal. Ces réparations consistent à reboucher des fissures et des trous ainsi que de réduire la taille des entonnoirs des coulées pour faciliter éventuellement le découpage de la partie reliant l'entonnoir à la lame. Hormis la réduction de la taille des

entonnoirs et de l'épaisseur de quelques îlots dans les parties d'emmanchement, les dimensions générales des modèles d'ébauches en cire n'ont pas changé.

3.3.2- Fabrication des moules en terre cuite par la technique de la cire perdue

La réussite de la coulée d'un objet en alliage cuivreux dans un moule dépend en grande partie des matériaux qui le constituent. Ainsi, il est important d'utiliser une recette de terre de moule qui ne présente pas de retrait important en cours de son séchage et de sa cuisson et qui soit capable de supporter le métal liquide.

Nous avons opté pour une recette de terre constituée d'argile non dégraissée, de sable siliceux ($\text{SiO}_2 > 97 \%$) et de crottin de cheval (Pernot *et al.*, 1993). Ce dernier ingrédient, constitué en grande partie de végétaux mal digérés et découpés en petits morceaux, est utilisé comme dégraissant végétal pour réduire le retrait de la terre de moule durant le séchage et pour augmenter la porosité de la terre une fois cuite. Le crottin a été tamisé pour récupérer uniquement les morceaux inférieurs à 2 mm. La quantité utilisée dans la recette de terre représente le même volume que le mélange d'argile et du sable (20 % argile et 80 % sable). Une fois tous les ingrédients préparés, ils ont été mélangés pour constituer la terre utilisée pour la fabrication du moule.

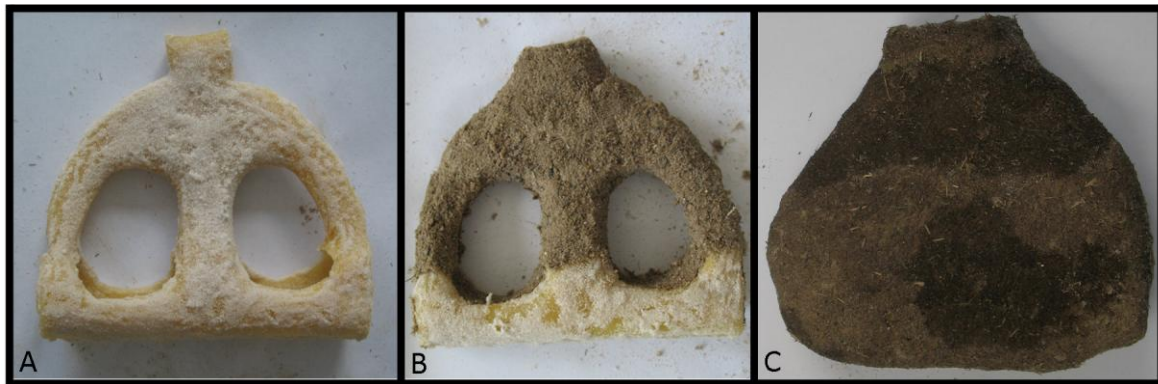


Figure 54 : principales étapes de la fabrication d'un moule en terre cuite : A- application d'une couche constituée de sable fin sur le modèle en cire ; B et C- l'application de plusieurs couches de terre de moule sur le modèle pour créer une enveloppe de 1.5 à 2 cm d'épaisseur.

Les modèles en cire ont été nettoyés à l'eau avant l'application de la terre de moule. Chaque modèle a été enduit d'un liant organique sur lequel a été appliquée une couche fine de sable siliceux (Fig. 54 A). Le but de cette opération vise à créer une couche de texture fine capable de reproduire les moindres détails de la surface du modèle en cire. Cependant ce choix ne s'est pas avéré approprié et, comme mentionné dans les paragraphes qui suivent, la fragilité de cette couche a conduit à la détérioration de l'état de surface de l'ébauche en alliage cuivreux. Une fois la première couche de sable séchée, plusieurs couches de la terre de moule, préparée auparavant, ont été appliquées (Fig. 54 B). Les couches successives ont été appliquées sur couche sèche. A la fin de cette opération, des moules avec des parois d'épaisseur variant entre 1.5 et 2 cm ont été produits (Fig. 54 C). Ils ont été ensuite séchés et « décirés » à une température de 100 °C.

Plusieurs essais de cuissons ont été effectués sur des échantillons de terre de moule. Ces essais ont montré qu'une fois le dégraissant végétal brûlé, la terre devient friable à cause de l'insuffisance de la quantité d'argile nécessaire à la bonne cohésion de la terre du moule. Pour consolider les moules durant la cuisson et la coulée, une dernière couche extérieure de 0.5 cm d'épaisseur contenant de l'argile et du sable (50 % Argile et 50% sable) a été ajoutée. Les moules ont subi ensuite une cuisson longue, à faible température, pour compléter le séchage et brûler la cire infiltrée à l'intérieur des parois des moules. Finalement une dernière cuisson à haute température a été appliquée pour brûler le dégraissant végétal et consolider la couche externe riche en argile. Les opérations de consolidations et de cuissons se sont déroulées dans l'aire d'archéologie expérimentale à Barys en Belgique. Elles ont été appliquées uniquement sur trois moules. Ces moules ont été réalisés pour produire une hache fenestrée large, une pointe de lance à douille longue et une hache fenestrée étroite.

3.3.3- Fabrication des moules en pierre tendre

Trois blocs de pierre tendre, vendue sous la désignation de stéatite ou pierre de savon, ont été sculptés pour fabriquer trois moules : deux moules pour créer deux haches fenestrées étroites de dimensions différentes (Fig. 55), et un moule pour créer des ébauches de pointes de lances à douille courte. Les tests de cuissons ont montré que cette pierre résiste bien aux températures hautes (< 1200°C) et emmagasine la chaleur. De surcroît cette pierre composée essentiellement de talc (1.00 sur l'échelle de Mohs) peut être facilement sculptée.



Figure 55 : A- les deux pièces en pierre du moule utilisé pour la production des haches fenestrées étroites de petites dimensions. B- l'ensemble des pièces (2 pièces en pierre pour les empreintes externes et un noyau) du moule utilisé pour la fabrication de la hache fenestrée étroite de grandes dimensions. C- l'ensemble des pièces (2 pièces en pierre pour les empreintes externes et un noyau) du moule utilisé pour la fabrication des pointes de lances à douille courtes.

Chaque moule est composé de trois pièces ; deux en pierre pour créer la forme extérieure de l'ébauche et un noyau en terre cuite pour créer le vide ou la forme intérieure du collet de la hache ou de la douille de la pointe de lance. Confectionnés selon les modèles archéologiques, les moules en pierre présentent, en plus de l'empreinte de l'ébauche, un entonnoir de coulée, des événements et des trous de fixation dans lesquels s'insère un tenon qui évite le glissement des deux pièces en pierre. Dans les moules des haches fenestrées (Fig. 55 A et B), les noyaux sont maintenus en place par l'intermédiaire de deux trous taillés dans les parois de chaque pièce en pierre au niveau du collet. Ces trous servent aussi à maintenir le noyau dans une position surélevée par rapport aux empreintes du collet. Dans le moule de pointe de lance à douille courte (Fig. 55 C), un seul trou a été creusé dans les pièces en pierre au niveau de la base de la partie proximale de la douille. De plus, un relief en triangle, dont la base commence au niveau de l'extrémité inférieure de la partie proximale et dont le sommet est situé dans la partie supérieure de la zone distale, a été aménagé. Ce relief, sur lequel repose le noyau en forme de cône, sert à créer l'ouverture en forme de V dans l'ébauche au niveau de la douille.

Les noyaux ont été réalisés selon une recette contenant les mêmes ingrédients que celle des moules en terre cuite. Au vu de la fragilité de cette dernière, il a été décidé d'augmenter la proportion d'argile dans le mélange argile-sable jusqu'à 50 %, assurant ainsi la solidité des noyaux après la cuisson et durant la coulée. La proportion de dégraissant végétal représentait toujours le même volume que le mélange argile-sable. La cuisson des

noyaux s'est déroulée à l'IRAMAT-CRPAA dans des fours électriques avec une montée progressive de la température (200 °C par heure) jusqu'à 800 °C. Sept noyaux ont été confectionnés pour chaque type de moule en pierre. Aucun retrait significatif n'a été constaté après la cuisson. Cependant, de légères modifications ont été effectuées après la cuisson pour régulariser la surface du noyau.

3.3.4- La coulée

Pour fondre le métal, un four à ventilation naturelle a été utilisé (Thomas, 2010). Notons que celui-ci n'est pas directement inspiré de fours du Bronze Moyen. Le four fabriqué en briques réfractaires présente une hauteur de 1 m et une largeur de 1 m à sa base et de 0.5 m à son sommet. Il est équipé d'une sole perforée sur laquelle reposent les creusets. La sole située à une hauteur de 0.4 m, sépare le four en une partie inférieure appelée « cendrier » qui reçoit la cendre et une partie supérieure qui reçoit les creusets et le charbon de bois. Le cendrier présente une grande ouverture qui permet de laisser passer l'air nécessaire au bon fonctionnement du four. Le four est équipé de trois thermocouples répartis sur 25 cm (écart de 5 cm entre chaque thermocouple) au-dessus de la sole d'une manière à enregistrer les variations de température sur toute la hauteur du creuset. Ainsi les températures enregistrées représentent la température du four et non celle du métal à l'intérieur du creuset.

Toutes les expérimentations (annexe 1 : T.a. 17) ont été conduites en plein air. Les coulées entreprises peuvent être divisées en quatre séries, chacune représentant des conditions expérimentales différentes, que se soit au niveau des alliages ou du nombre et du type de moules utilisés. Pour la plupart des coulées, des creusets de 1 L ont été utilisés. La deuxième série de coulées présente la seule exception où, en plus des creusets de 1 L, un autre de 2 L de contenance a été utilisé. Durant la coulée, les moules ont été positionnés dans une position légèrement inclinée ; l'axe longitudinal du moule présentait un angle variant entre 85° et 75° par rapport au sol. Avant chaque série de coulées, les creusets et les moules ont été séchés et chauffés pendant au moins une heure. Le réchauffement a été appliqué pour éliminer l'humidité contenue dans les moules et les creusets ; le choc thermique causé par une montée rapide en température, que ce soit à l'intérieur du four ou durant l'interaction entre métal liquide et moule, mène à une dilatation rapide de l'eau qui, en se transformant en vapeur, peut provoquer des défauts dans l'objet coulé et des fissures dans le moule ou le creuset.

La première série de coulées (Fig. 56) a porté sur les trois moules en pierre pour produire deux haches fenestrées étroites et une pointe de lance courte. Cependant, des préparations ont été nécessaires avant le déroulement de cette opération. Les empreintes de chaque moule ont tout d'abord été recouvertes par une couche fine de suie de bougie. Cette couche a été appliquée pour faciliter le démoulage. Ensuite, les moules ont été assemblés et chauffés avec les creusets à basse température durant l'heure précédant la coulée. Un bronze à 9 Wt.% d'étain a été utilisé pour fabriquer deux haches fenestrées étroites de dimensions différentes. La pointe de lance courte a été fabriquée à partir d'un bronze à 14 % (en masse) d'étain. La température du four au moment de la sortie de chacun des deux creusets variait entre 960 et 1130 °C. Cet écart en température correspond au gradient thermique au sein du four entre la position du premier thermocouple et celle du troisième.

Les haches fenestrées obtenues présentent des défauts qui se manifestent par la présence occasionnelle de quelques trous profonds, de dimensions variables, situés sur la lame et l'entonnoir, par la présence de quelques fragments de charbon dans le métal et surtout par un mauvais remplissage des empreintes des collets. Ce dernier défaut résulte du fait que le bronze à 9 % (en masse) d'étain n'a pas été assez fluide au moment de la coulée pour pouvoir pénétrer dans les empreintes fines des collets. La pointe de lance présente un remplissage presque complet des empreintes fines de la douille. Les défauts observés sur celle-ci consistent en des trous isolés de petites dimensions dans la lame, quelques fragments de charbon dans le métal et occasionnellement des trous liés à l'irrégularité de certaines parties présentes dans l'empreinte mince de la douille. Ces irrégularités d'épaisseur ont produit des domaines dans les empreintes trop fins pour empêcher le métal d'y pénétrer.

La deuxième série de coulées (Fig. 56) a portée sur trois moules en terre cuite et trois moules en pierre. Une pointe de lance à douille longue a été fabriquée à partir d'un bronze à 14 % (en masse) d'étain et coulée dans un moule en terre cuite. Un bronze à 9 % (en masse) d'étain a été utilisé pour fabriquer une hache fenestrée large, une hache fenestrée étroite et une pointe de lance à douille courte. Cette dernière a été coulée dans un moule en pierre tandis que les deux autres armes ont été coulées dans des moules en terre cuite. Finalement, deux haches fenestrées étroites, faites à partir d'un bronze au plomb (9 % d'étain et 10 % de plomb, en masse), ont été coulées dans deux moules en pierre. Au moment de la sortie du premier creuset, la température du four variait entre 1000 et 1250°C (annexe 3 : ill. 5). Les moules en pierre ont subi des préparations similaires à celles qui ont été appliquées avant la première série de coulées. Cependant, avant la deuxième série coulée, ils ont été exposés brièvement à la pluie.

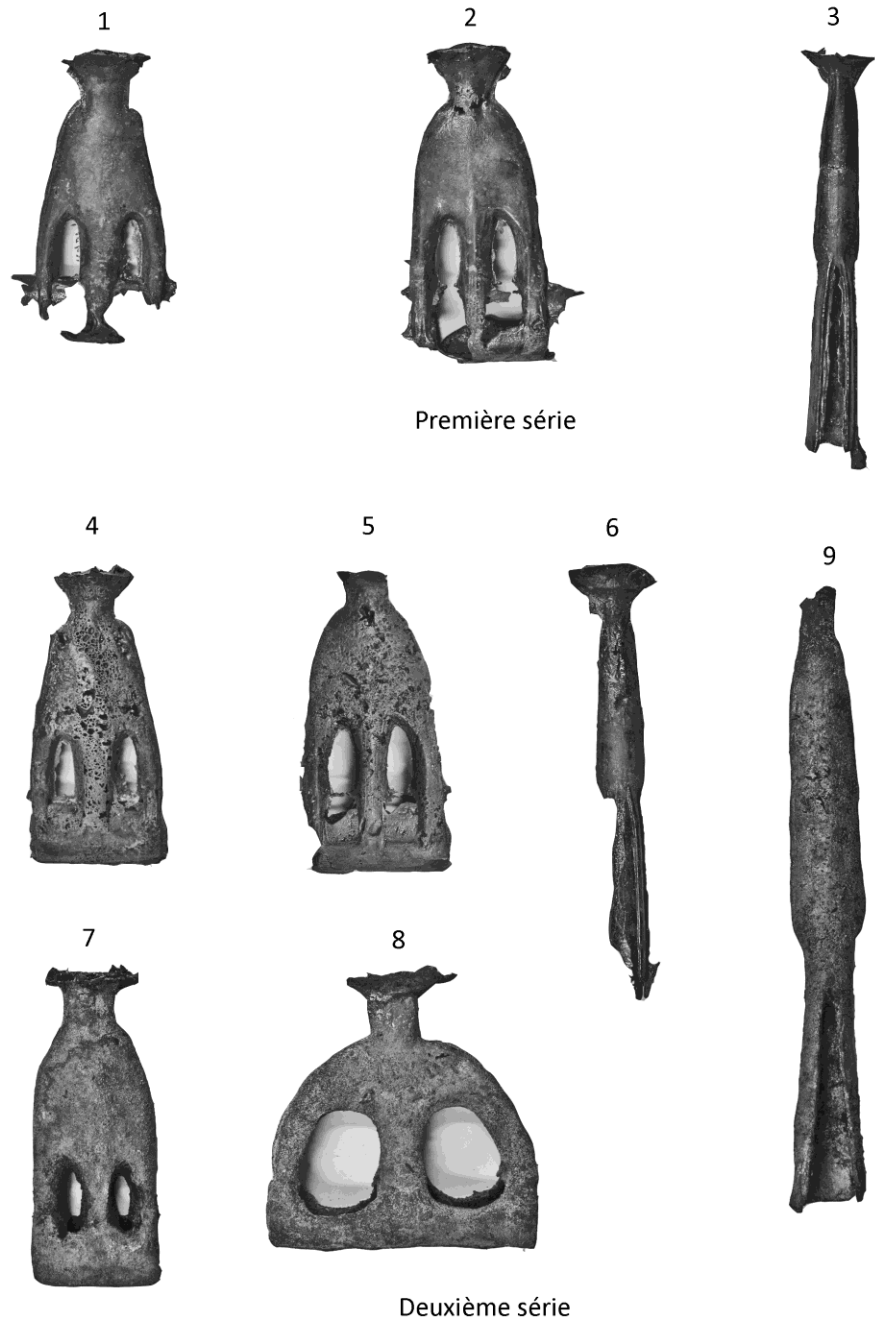


Figure 56 : Durant la première et la deuxième séries de coulées, des moules en pierre ont été utilisés pour produire une hache fenestrée étroite de petites dimensions (1 et 4), une hache fenestrée étroite de grandes dimensions (2 et 5) et une pointe de lance à douille courte (3 et 6). Les moules en terre cuite ont été utilisés uniquement dans la deuxième série pour créer une hache fenestrée étroite (7), une hache fenestrée large (8) et une pointe de lance à douille longue (9).

Les problèmes liés au mauvais remplissage des empreintes fines par le métal liquide n'ont pas été observés sur les objets obtenus par les moules en terre cuite. Cependant, tous ces objets présentent une surface rugueuse. Cet aspect est certainement lié à la fragilité de la surface des empreintes des moules qui s'est probablement effritée durant la coulée. La pointe de lance à douille courte a été mal remplie au niveau de la douille à cause d'un mauvais positionnement du noyau. Elle présente quelques trous profonds sur la lame et la partie connectant la lame et l'entonnoir. Les haches produites par les moules en pierre présentent un meilleur remplissage en métal au niveau du collet que celles de la première série de coulées.

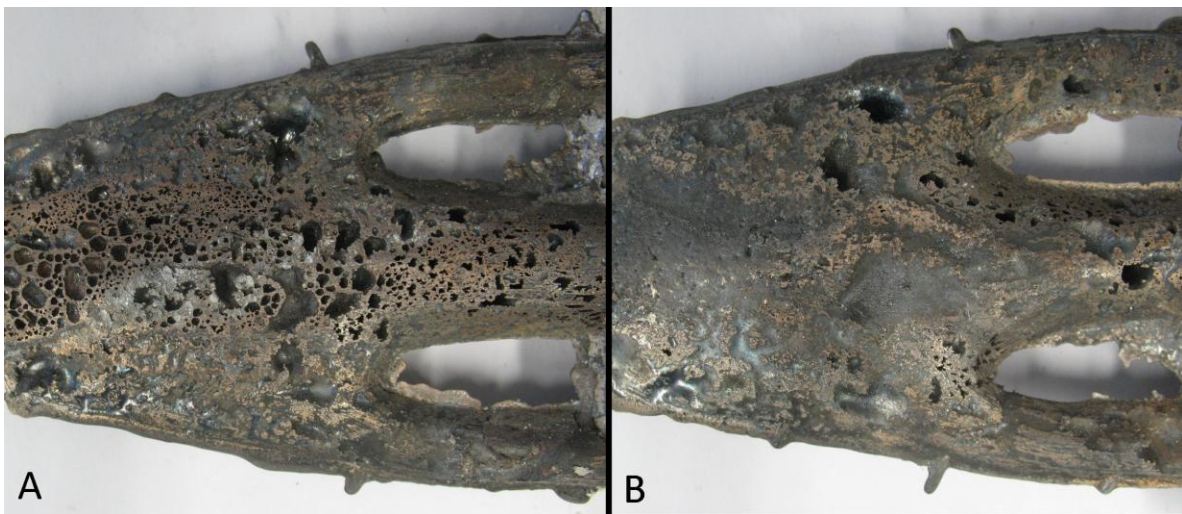


Figure 57 : A- porosité observée sur l'une des deux faces de la hache fenestrée étroite. Les trous constituant cette porosité sont peu profonds et présentent une texture lisse. B- crevasses et trous profonds de forme conique observés sur l'autre face.

Une quantité considérable de défauts a été observée sur les objets obtenus à partir des moules en pierre. La hache fenestrée étroite de petites dimensions présente de la porosité (Fig. 57 A) sur l'ensemble de la face. Celle-ci correspond aux empreintes de la pièce inférieure du moule, en position inclinée durant la coulée. Cette porosité est constituée de trous peu profonds à texture lisse. La face opposée de cette hache présente surtout des crevasses larges superficielles et, occasionnellement, des trous isolés et profonds en forme de cône (Fig. 57 B). De nombreux fragments de charbon de bois ont été observés sur la surface de la hache fenestrée étroite de grandes dimensions (Fig. 58 A). Ce défaut est dû à une erreur humaine car le métal liquide n'a pas été dégrasé du charbon de bois avant la coulée.

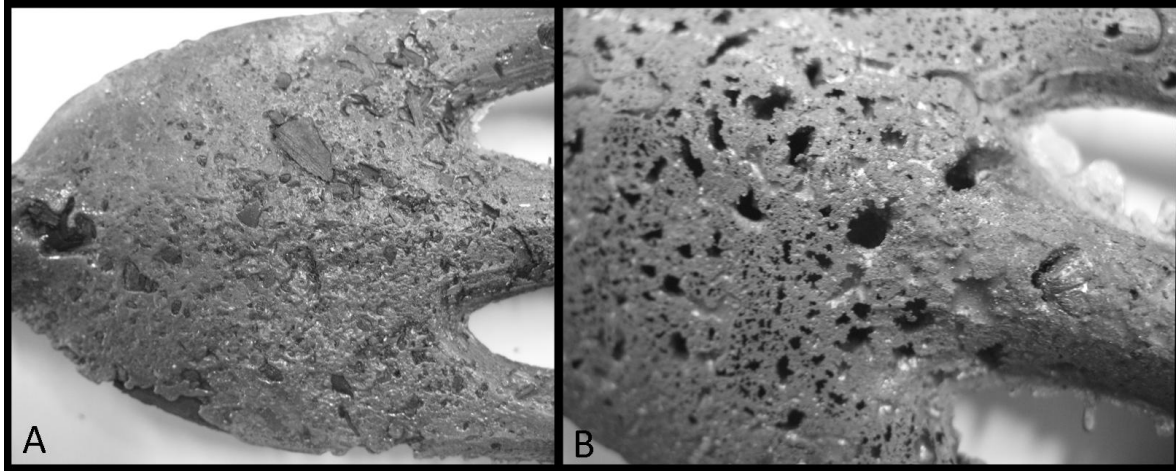


Figure 58 : A- fragments de charbon de bois dans la surface de la lame de de la hache fenestrée étroite de grandes dimensions créée durant la deuxième série de coulées. B- trous profonds et étroits observés sur la lame de la hache fenestrée étroite de grandes dimensions créée durant la quatrième série de coulées.

Au cours de la troisième série de coulées (Fig. 59), deux haches fenestrées réalisées à partir d'un bronze au plomb (9 % d'étain et 20 % de plomb, en masse) ont été produites à partir de moules en pierre. Les moules ont été utilisés après avoir été nettoyés, mais sans l'application d'une couche de suie de bougie sur les empreintes. Une fois assemblés, les moules ont été séchés avec les creusets sur un feu moyen. Comme nous l'avons déjà mentionné, ces deux moules en pierre produisent des haches de dimensions différentes. Des problèmes liés aux intempéries ont provoqué l'arrêt des acquisitions des températures. L'observation de la hache fenestrée de petites dimensions montre que l'empreinte du moule n'a pas été bien remplie au niveau du collet, tandis que la hache fenestrée de grandes dimensions ne présente pas ce défaut. Les deux haches de la troisième série présentent des défauts similaires, mais en quantité plus réduite, à ceux de la hache fenestrée étroite de petites dimensions fabriquée durant la deuxième série de coulées. Ils sont concentrés sur la lame et la partie inférieure de l'entonnoir.

Une quatrième et dernière coulée (Fig. 59) a été mise en œuvre pour fabriquer une hache fenestrée étroite de grandes dimensions en utilisant le moule en pierre. Ce dernier a été séché et chauffé sur un feu fort. L'alliage utilisé dans la fabrication de cette hache est un bronze à 9 % d'étain. Les empreintes du moule ont été complètement remplies par le métal. Cependant, la totalité de la hache présente une porosité constituée de trous coniques profonds, à texture rugueuse. A ces défauts s'ajoutent quelques crevasses réparties sur l'ensemble de la hache (Fig. 58 B).



Figure 59 : haches fenestrées étroites coulées dans des moules en pierre durant la troisième (1 et 2) et la quatrième série (3) de coulées.

3.3.5- Discussion

3.3.5.1- Moule en terre cuite vs moule en pierre tendre

L'ensemble de ces expérimentations nous a permis de valider le bon fonctionnement de la forme des moules proposée pour la coulée des ébauches de pointes de lances à douille. Ces pointes de lances pouvaient être coulées dans des moules en pierre ou en terre cuite. Les moules en pierre tendre sont facilement sculptés. Chaque moule en pierre offre une grande reproductibilité au niveau des dimensions des pièces obtenues (annexe 1 : T.a. 17). Ils présentent un rendement élevé dû à la rapidité de leur assemblage et au nombre réduit de préparations requises (nettoyage et séchage) entre chaque coulée. Ainsi ces moules, facilement transportables, ont pu contribuer à la diffusion de certains types d'armes. Le problème principal de ces moules en trois pièces est le mauvais positionnement du noyau en terre à l'intérieur du moule et l'irrégularité de son épaisseur. Ce problème peut provoquer un mauvais remplissage des empreintes fines comme cela a été observé pour les haches de la première série de coulées et la pointe de lance courte de la deuxième série de coulées. Cependant, ce défaut n'est pas lié au concept du moule en

trois pièces mais plutôt à notre manque d'expérience dans ce domaine et donc il aurait été probablement évité par les artisans expérimentés du Bronze Moyen.

Bien que ce soient uniquement des moules en pierre qui ont été retrouvés, et identifiés comme tels, sur les sites archéologiques du Bronze Moyen, il ne faut pas écarter la possibilité que des moules en terre cuite fabriqués par la technique de la cire perdue aient été utilisés durant l'époque en question. Cette possibilité est à considérer surtout dans le cas des pointes de lances à douille où la seule pièce de moule en pierre qui aurait pu produire de telles pointes de lances a été retrouvée hors contexte à Byblos (Dunand 1939 ; 425, fig. 312). La technique de la cire perdue impose la destruction du moule pour récupérer la pièce coulée. Il faut donc imaginer que, dans un atelier permanent, une fois que le moule est détruit, ses fragments seront jetés ou récupérés et broyés pour être utilisés comme dégraissant dans d'autres moules. Ainsi il n'est pas étonnant que ces moules et leurs fragments soient rarement retrouvés dans des contextes archéologiques. Par rapport aux moules en pierre, cette méthode présente l'avantage de pouvoir détecter et réparer les défauts liés à la forme de l'ébauche ou à l'irrégularité des épaisseurs sur le modèle en cire. Par exemple, les réparations que nous avons appliquées sur les modèles en cire nous ont permis d'éviter le problème du mauvais remplissage des moules, et hormis l'état de surface rugueux, très peu de défauts ont été repérés sur les pièces en alliage cuivreux. Dans le cas des moules en pierre, et comme cela a été le cas avec les haches et les pointes de lances des première et deuxième séries de coulées, ces défauts ne sont repérés qu'une fois la pièce métallique coulée. Ces moules présentent donc le risque de produire des pièces qui ne sont pas utilisables à cause des défauts.

L'un des inconvénients majeurs des moules en terre cuite fabriqués par la technique de la cire perdue est le retrait de la pâte du moule durant le séchage et la cuisson. Ceci peut produire des fissurations dans les parois du moule et peut présenter un manque de reproductibilité au niveau des dimensions des objets. Au vu des variations de dimensions des armes étudiées, il n'est pas certain que la reproductibilité des dimensions exactes de chaque type d'armes constituait un critère important au Bronze Moyen. Le problème du retrait de la pâte est lié à la recette du matériau du moule, pour laquelle l'artisan doit trouver l'équilibre entre les proportions de dégraissant et d'argile. D'une part, l'utilisation d'une grande quantité de dégraissant réduit le retrait de l'argile, cependant cela réduit également la plasticité de la pâte et donc fragilise le moule. D'autre part, la réduction de la quantité du dégraissant augmente la plasticité de la pâte et la solidité du moule, mais peut provoquer des retraits et des fissurations et par conséquent conduire à la perte de la forme originelle de l'objet ou même rendre le moule inexploitable.

Nous avons remarqué que le procédé complet de la fabrication d'un moule en terre cuite par la technique de la cire perdue exige considérablement plus de temps et de préparation que celui d'un moule en pierre. Ceci est principalement dû au temps de séchage et de cuisson requis pour les moules en terre. Une telle comparaison peut donner l'impression que les moules en pierre sont plus adaptés à la production en grande quantité que les moules en terre cuite. Cependant, cette conclusion n'est valable que si on considère qu'à chaque fois qu'un artisan veut réaliser un objet il doit reprendre tout le procédé de fabrication des moules en terre. En réalité, la préparation d'un certain nombre de moules en terre, pour la fabrication d'un même type d'objets en plusieurs exemplaires, n'implique pas la multiplication du temps de fabrication d'un seul moule par le nombre de moules à fabriquer : un seul moule permanent est nécessaire pour fabriquer tous les modèles en cire, l'ensemble des moules peut être séché, cuit et utilisé en même temps. Ainsi plusieurs moules peuvent être produits dans un temps qui n'excède pas beaucoup celui de la production d'un seul moule en terre. La vitesse de production d'une grande quantité d'un même type d'objets dépend de l'organisation du travail dans l'atelier et des préparations préliminaires des recettes avant la fabrication des moules. Dans la production des armes du Bronze Moyen, les moules en pierre et ceux en terre cuite présentent des difficultés au niveau de la fabrication et l'utilisation. Cependant, elles restent facilement contournables pour des artisans expérimentés. L'utilisation d'un certain type de moule n'est donc pas nécessairement liée à sa supériorité au niveau de la performance. Elle est plutôt liée à la tradition artisanale, à la disponibilité de la matière première nécessaire pour la fabrication des moules, au nombre d'artisans travaillant dans un atelier et au mode de production.

3.3.5.2- Propriétés des alliages et les défauts

La comparaison des propriétés des différents alliages utilisés dans ces expérimentations n'est pas possible à cause de la variation de plusieurs conditions entre chaque série de coulées. Quoiqu'il en soit, aucun avantage ou désavantage d'un alliage sur un autre n'a pu être constaté. Par exemple, dans le cas des moules en pierre de haches fenestrées, le bronze à 9 % d'étain et les bronzes au plomb ont tous produit des haches sans défauts de remplissage. Le mauvais remplissage des moules de haches durant la première série de coulées est très probablement lié à la basse température de coulée, où le métal liquide n'a pas été assez fluide pour pénétrer dans les empreintes minces.

La porosité est, hormis le mauvais remplissage des empreintes, le plus important type de défaut observé sur les pièces coulées. Celle-ci a été observée à partir de la deuxième série de coulée sur tous les objets coulés dans les moules en pierre. Ceci correspond au moment où ces moules ont été exposés aux intempéries: du fait de la

position inclinée du moule, les empreintes de la face inférieure auront été les plus exposées à l'humidité qui se manifeste par quelques gouttes d'eau. La porosité observée sur la face de l'objet correspondant à cette face du moule aurait donc été créée par le contact du métal en fusion avec ce milieu humide. L'ensemble de trous lisses et peu profonds observés sur cette face des haches aurait ainsi été provoqué par l'évaporation de l'eau. La position inclinée du moule aurait certainement favorisé l'échappement d'une partie de la vapeur d'eau générée par ce contact. Par contre, au vu de la grande quantité de gaz produit par l'évaporation, une partie de la vapeur aurait été piégée entre le métal et les empreintes de la face supérieure du moule. Ces gaz piégés auraient provoqué la création des larges crevasses observées sur la face opposée à celle présentant la porosité. Ces crevasses pourraient aussi être créées par un retrait brusque du métal. Ceci montre l'importance de la mise en forme du métal sous abri, comme c'est le cas souvent dans les ateliers de fonderie, et de favoriser les saisons ou les jours de temps sec pour effectuer les coulées.

La forme conique des trous à texture rugueuse, comme ceux observés sur la hache de la quatrième série, évoque des défauts liés aux gaz dégagés par le moule ou à un retrait du métal. Dans le premier cas, un mauvais nettoyage des empreintes du moule avant la coulée aurait pu provoquer ces dégagements gazeux. Le deuxième cas nous paraît douteux du fait que le moule a été particulièrement bien chauffé avant la coulée. La texture rugueuse de ces trous semble indiquer qu'ils sont produits à un moment avancé de la solidification.

Les trous occasionnels trouvés sur le centre de la lame et sur l'entonnoir peuvent provenir des gaz solubilisés dans le métal durant la fonte. La localisation de ces défauts sur les parties massives et donc qui se solidifient en dernier, semble confirmer ce propos. La possibilité que les défauts observés sur la hache fabriquée durant la quatrième coulée soient produits par des gaz solubilisés dans le métal en fusion n'est pas à exclure.

Les problèmes de mauvais remplissage sont observés au niveau des parties minces des armes. Des défauts similaires ont été relevés sur des exemplaires archéologiques comme la hache fenestrée large 11655. Ils sont dus soit au mauvais positionnement du noyau, soit à la tension de surface dont l'effet commence à devenir important dans des empreintes plus minces que 2 mm (Campbell, 2004 ; 75-76). Plusieurs facteurs, comme la fluidité et la mouillabilité du métal, le dégazage du moule, les matériaux et la forme du moule, pourraient influencer ce phénomène. Dans le cas des haches fenestrées de la première série de coulée, il est évident que le métal n'était pas assez fluide pour pouvoir remplir les empreintes minces du collet. Cette faible fluidité est certainement liée à la basse température de surchauffe.

Chapitre 4

Analyses des isotopes du plomb

3.4.1- Représentation des résultats

Les rapports des isotopes du plomb sont conventionnellement représentés sur un diagramme binaire confrontant les rapports $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ en ordonnée et $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ en abscisse. Des diagrammes binaires présentant $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ en fonction de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ en fonction de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ sont aussi utilisés. Kramers et Tolstikhin (1997) ont modélisé cinq courbes d'évolution des rapports isotopiques du plomb, correspondant aux développements, dans le temps, des cinq réservoirs géologiques dont peuvent être issus les fluides minéralisateurs. Ce modèle est intégré dans les diagrammes $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ comme paramètre additionnel permettant de mieux discriminer les sources selon le temps, la durée et les conditions de leur formation. Ces paramètres sont identifiables par la signature du champ isotopique de la source (Cattin, 2008).

3.4.2- Les échantillons

Des échantillons ont été prélevés sur huit pointes de lances longues (10268, 11856, 11913, 11914, 11921, 27855, 27856, 27884), sur quatre pointes de lances présentant des brasures (10976, 10977, 10982, 10997) et sur cinq pointes de lances courtes provenant du dépôt β (10274, 10277, 10279, 10280, 10301, 10303) dont trois appartiennent au Type 10 (10274, 10279, 10301) de Philip (1989 ; 96). Ces trois groupes de pointes de lances diffèrent par leur technique de fabrication, leur forme, leur poids et la qualité de leur cuivre. Cette étude a été entreprise afin de déterminer si ces variations pouvaient refléter des sources de cuivre différentes suivant le groupe de pointe de lance. Le corpus a été enrichi des prélèvements sur la hache fenestrée 26759 et le poignard d'Arqa 26757, ainsi que sur une

hache fenestrée étroite 6273 et un poignard à double rainure 27902 de Byblos. Evidemment, le nombre d'échantillons étudiés n'est pas suffisamment représentatif pour permettre d'avancer des conclusions sur la totalité des sources de cuivre utilisées à Byblos et à Arqa et sur le commerce de ce métal durant cette période.

3.4.3- Présentation et interprétation des résultats

Les valeurs obtenues pour les pointes de lances 10277, 10301, 10303 et 27884 (annexe 1 : T.a. 18) présentent des incertitudes importantes en raison de la faible précision des mesures liée aux faibles teneurs en plomb. Ainsi, l'évaluation des rapports isotopiques de ces quatre armes sur les diagrammes $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (annexe 3 : ill. 6 et 7) et leur interprétation restent soumises à des précautions.

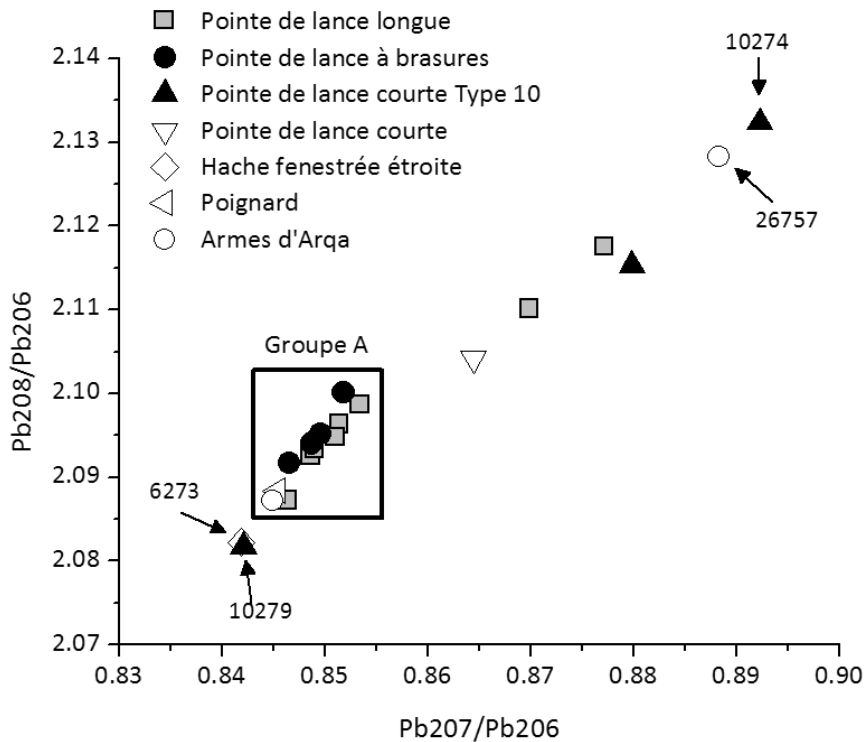


Figure 60 : Diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montrant les rapports isotopiques des armes analysées. Les armes 10977, 10978, 10997, 10982, 10268, 11856, 11913, 26759, 27855, 27856 et 27902 formant le groupe A présentent des rapports isotopiques proches.

Les données observées sur les trois diagrammes montrent que les pointes de lances à douilles présentant des brasures (10977, 10978, 10997 et 10982), cinq pointes de lances à douilles longues (10268, 11856, 11913, 27855 et 27856) et la hache d'Arqa (26759) possèdent des rapports isotopiques relativement proches. Ces dix objets constituent un groupe isotopique homogène qui pourrait provenir de la même source ou du même mélange de sources (Fig. 60). La pointe de lance à douille longue 27884 peut aussi appartenir à ce groupe, bien que sur les diagrammes $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ elle présente de grandes incertitudes liées à des teneurs très faibles en plomb. Pour faciliter la présentation des données ce groupe sera désigné par le groupe « A ».

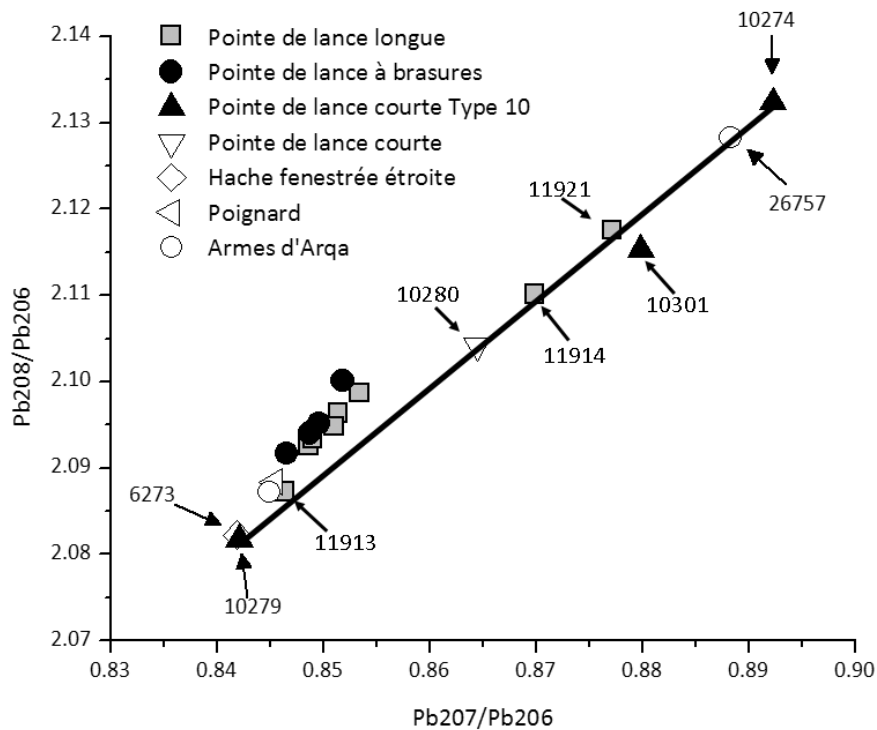


Figure 61 : La ligne d'évolution « B », en noir, représentée sur le diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ montre que plusieurs armes présentent le même comportement. La pointe de lance 10277 n'est pas représentée.

Le diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Fig. 60 et 61) montre que le poignard 27902 peu être inclus dans le groupe « A ». Le même diagramme montre aussi que la pointe de lance à douille repliée 10279 ainsi que la hache fenestrée 6273 présentent des rapports isotopiques proches de ceux du groupe « A ». Par contre, sur les diagrammes $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ces trois armes sont assez écartées de ce groupe. Une contamination provoquée par la corrosion complète de l'échantillon, l'utilisation d'un métal d'une source différente ou bien un mélange de plusieurs sources peuvent être à l'origine de l'écartement du poignard 27902. Ces deux dernières possibilités peuvent aussi s'appliquer à la pointe de lance 10279 et de la hache 6723. D'ailleurs, les analyses élémentaires ont montré que les haches fenestrées étroites présentent une grande variabilité de type d'alliage qui peut être dû à un recyclage. De plus, l'ajout volontaire du plomb est attesté dans plusieurs de ces haches. Ainsi, l'écartement du rapport isotopique de la hache 6273 peut être expliqué par un mélange de plusieurs sources de cuivre et possiblement de plomb (0.7 Wt. %) avec une composante importante du cuivre provenant de la (des) même source(s) que celle(s) du groupe « A ».

Les données présentées sur le diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Fig.61) montrent que les rapports isotopiques des armes 10274, 10277, 10280, 10301, 11914, 11921 et 26757 sont très dispersés. Cependant les armes 10274, 10280, 11914, 11921 et 26757 sont toutes situées sur la même ligne⁴⁵ qui sera désignée par la ligne « B ».

La ligne « B » projetée vers la gauche pourrait inclure la pointe de lance 11913, la hache fenestrée 6273 et la pointe de lance à douille repliée 10279. Ainsi, toutes ces armes (10274, 10279, 10280, 11913, 11914, 11921, 6273, 26757) présentent le même comportement. Si la possibilité d'une source commune à ces huit armes ne peut pas être écartée, bien qu'elle reste peu probable, ce type de configuration (données sur une ligne) est régulièrement interprété comme le résultat de différentes contaminations et / ou d'un mélange d'une source principale avec d'autres sources en quantités mineures. L'association entre ces huit armes se manifeste aussi par la présence de toutes ces armes sur la courbe d'évolution de la jeune croûte supérieure représentée sur le diagramme $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Fig.62) ou directement en dessous. L'appartenance de six de ces armes au dépôt β laisse supposer une relation entre source(s) du métal employé et contexte archéologique. Cependant, l'écartement de 10268 et 10277, issues du même dépôt, de la ligne « B » ne permet pas de confirmer cette hypothèse. De plus, l'appartenance de 11913 au groupe « A » ne peut pas être négligée du fait de la proximité de leurs rapports isotopiques.

⁴⁵ La pointe de lance 10301 pourrait aussi appartenir à la ligne « B ». Le léger écartement de 10301 de cette ligne peut être dû aux incertitudes importantes liées à la faible teneur en plomb ainsi qu'à une contamination provoquée par un nettoyage à l'acide.

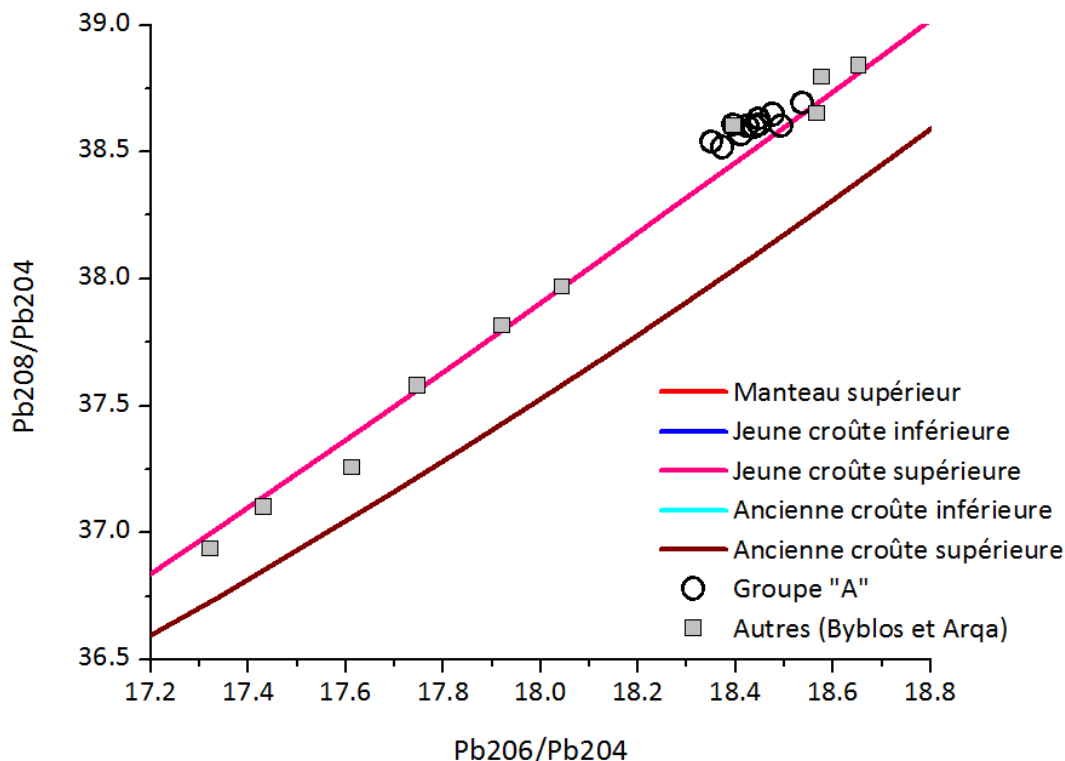


Figure 62 : Diagramme $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ représentant les données isotopiques des armes du groupe « A » ainsi que celles des autres armes de Byblos et Arqa.

La signature isotopique de la pointe de lance à douille repliée 10277 (annexe 3 : ill. 8 et 9) est assez particulière du fait de son écartement important par rapport à l'ensemble des armes analysées. Sur le diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, elle est considérablement éloignée des courbes d'évolution des réservoirs géologiques du plomb modélisées par Kramers et Tolstikin (1997). Ceci est dû à l'utilisation d'une source de cuivre radiogénique. Dans ce type de source, la minéralisation n'aurait pas conduit à la séparation de U et Th du minerai. Ainsi, l'apport continu en ^{208}Pb , ^{207}Pb et ^{206}Pb par U et Th aurait conduit à des rapports isotopiques élevés ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) et par conséquent un âge incompatible avec le Modèle de Kramers et Tolstikin (1997).

En résumé, la diversité des types d'armes (pointes de lances à douilles longues, pointes de lances à douilles présentant une ou des brasures et la hache fenestrée d'Arqa 26759) appartenant au groupe « A » et de leurs contextes (Arqa et dépôts β , λ , ζ , ι et χ), montre qu'il n'y a pas de corrélation entre type d'objet, dépôt et provenance. Les résultats

montrent également que plusieurs qualités de cuivre peuvent provenir de la même source. Nous pouvons donc envisager que le cuivre était préalablement trié en fonction de sa propreté. Le cuivre « propre » était réservé à la fabrication d'armes comme les pointes de lances à douilles longues et le cuivre « sale » était utilisé pour la production d'objets comme les pointes de lances à douilles à brasures. Le cuivre employé dans les pointes de lances courtes du « Type 10 » est certainement différent du celui du groupe « A », mais rien ne nous permet d'affirmer qu'il provient d'une source unique.

3.4.4- La détermination des sources du cuivre

Dans cette partie, les données obtenues pour les analyses des isotopes du plomb sont comparées avec les signatures isotopiques de mines, ou de districts miniers, du Proche Orient et de la partie est du Bassin Méditerranéen. Nous admettons que chaque arme contient du cuivre provenant d'une source unique, bien qu'en réalité elles peuvent être fabriquées à partir d'un mélange de deux ou plusieurs sources de cuivre et peuvent dans certains cas comporter du plomb ajouté. Une base de données, compilée par F. Cattin (2008), nous a permis de comparer nos résultats avec ceux de plusieurs mines et districts miniers en Europe Orientale, en Turquie et en Egypte. De plus, des données portant sur des sources et des objets d'Iran (Hauptmann *et al.*, 2003, Mirenjad *et al.*, 2011, Nezafati *et al.*, 2009), de Faynan en Jordanie (Hauptmann, 2007), de Hebron en Palestine, d'Arslantepe située dans le sud-est de la Turquie (Schmitt-Becker, Hauptmann, 2002), du Al-Midmman au Yémen (Weeks *et al.*, 2009), de l'Arabie Saoudite (Stacey, *et al.*, 1980, Bokhari and Kramers, 1982 d'après Hauptmann, 2007), de l'Anatolie orientale (Gale *et al.*, 1985), de Tell Abraq aux Emirats arabes Unis et d'Oman (Begemann *et al.*, 2010 ; Prangue, 1998) ont été exploitées.

D'après les données disponibles dans la littérature, les rapports isotopiques du plomb des objets étudiés ne correspondent pas aux signatures isotopiques des mines de Chypre (Attanasio *et al.*, 2001, Gale *et al.*, 1997), de la Grèce (Chalkias *et al.*, 1988, Stos-Gale, 1989, Stos-Gale, Gale, 2003), de Timna et plus largement du Sinäï (Bretscaife, 1997, Gale, Bachmann *et al.*, 1990, Hauptmann *et al.*, 1999), de l'Arabie Saoudite (Stacey, *et al.*, 1980, Bokhari and Kramers, 1982 d'après Hauptmann, 2007), de la Serbie (Gale *et al.*, 1991, 2000, Pernicka *et al.*, 1993), ni de la Bulgarie (Gale *et al.*, 1991, 2000) et des objets du Yémen (Weeks *et al.*, 2009).

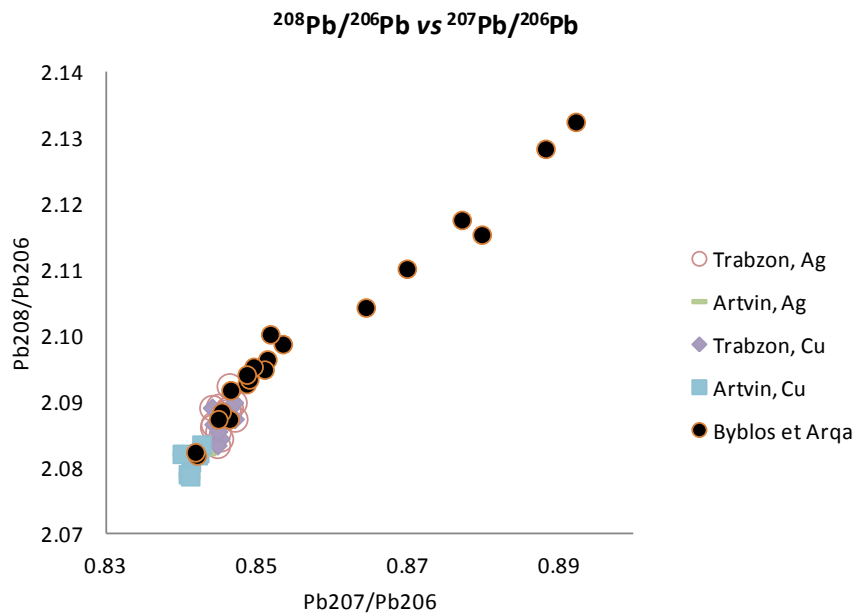


Figure 63 : Diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ montrant les signatures isotopiques des districts miniers anatoliens compatibles avec celles des armes de Byblos et d'Arqa.

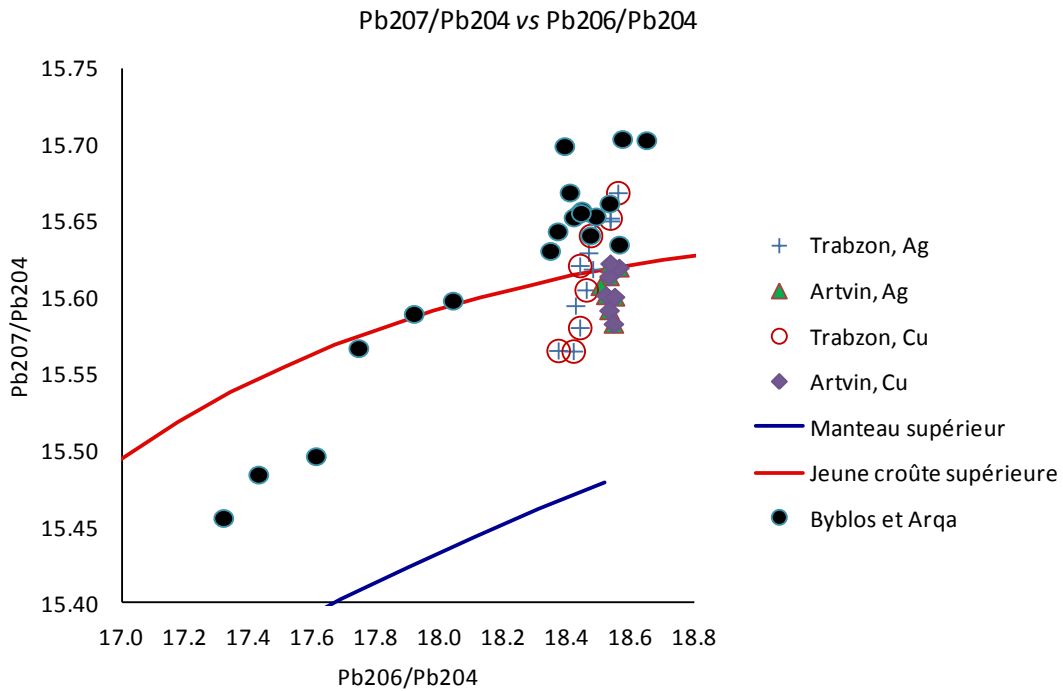


Figure 64 : Diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montrant les signatures isotopiques des districts miniers anatoliens compatibles avec les armes de Byblos et d'Arqa.

Concernant les districts miniers et les mines de la Turquie (Sayre *et al.*, 2001, Hirao *et al.*, 1995), les données isotopiques des armes 10977, 11913, 26759 et 27902 se superposent au champ isotopique de Trabzon sur la mer Noire (Fig. 63 et 64). Les rapports isotopiques de la hache 6273 et de la pointe de lance 10279 se superposent au champ isotopique des mines d'Artvin, localisées à l'est de Trabzon. De plus, les rapports isotopiques de tous ces objets (6273, 10279, 10977, 11913, 26759 et 27902) peuvent être inclus dans les champs isotopiques définis par des objets découverts à Mersin en Anatolie Orientale, datant du premier quart du deuxième millénaire (Gale, *et al.*, 1985), ainsi que dans le champ défini par les objets retrouvés dans les tombes royales d'Arslantepe datées du premier quart du troisième millénaire (Palmieri *et al.*, 2002).

Le district minier de Faynan (Hauptmann, 2007 ; 67-68) présente deux principales minéralisations de cuivre : le Dolomite-Limestone-Shale (DLS) et le Massive Brown Sandstone (MBS). Chacune de ces minéralisations possède sa propre signature isotopique (Hauptmann, 2007 ; 79-80). Si les rapports isotopiques de ces deux minéralisations sont considérés comme un seul ensemble, alors le groupe « A » et les armes 6273 et 10279 (Fig. 65 et 66) se superposent au champ isotopique commun (résultant). Cependant si leurs signatures isotopiques sont considérées comme distinctes, alors seules les armes 6273, 10279, 10977, 11913, 26759 et 27902 se superposeront au champ isotopique du MBS (Fig. 66). D'après Hauptmann (2007 ; 152), la période du Bronze Moyen marque un déclin dans l'exploitation des mines de Faynan. Parmi les deux minéralisations, seul le DLS présente les quelques traces d'exploitation revenant à cette période.

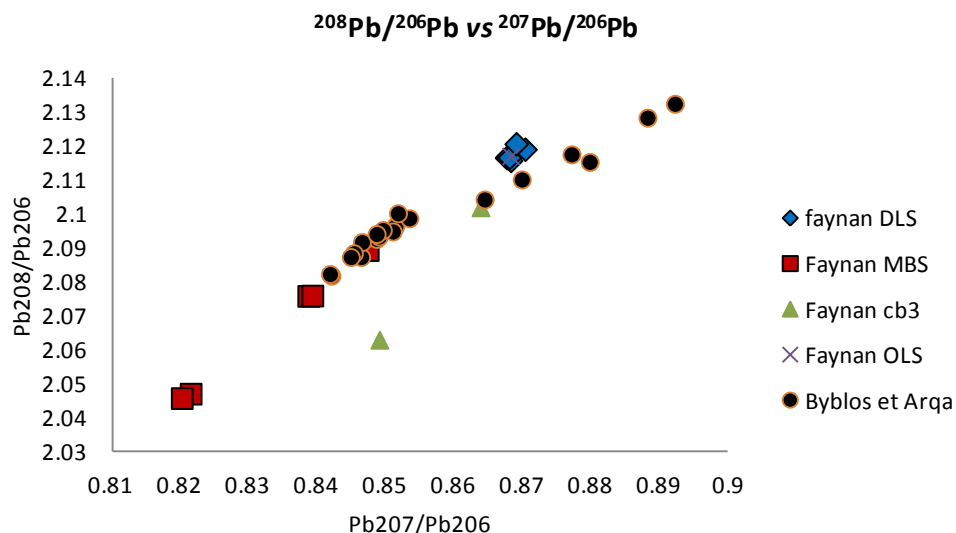


Figure 65 : Diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ montrant les signatures isotopiques des minéralisations de Faynan et celles des armes de Byblos et d'Arqa.

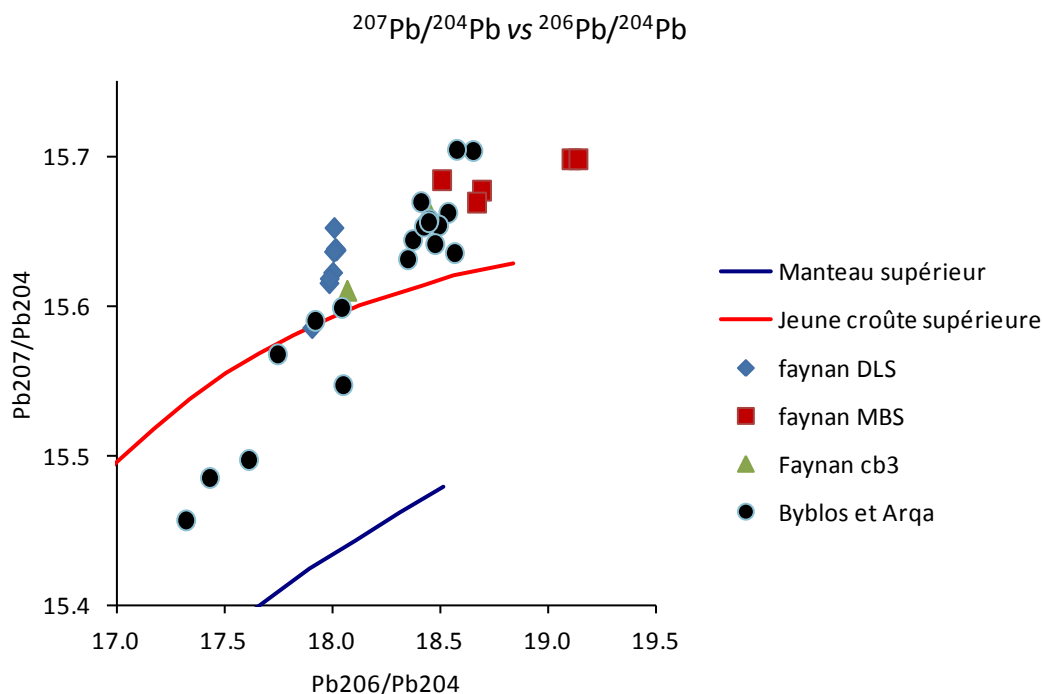


Figure 66 : Diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montrant les signatures isotopiques des minéralisations de Faynan et les armes de Byblos et d'Arqa.

Parmi les différentes minéralisations attestées en Iran, la zone de Sanadaj-Sirjan (SSZ) présente la signature isotopique (Mirnejad *et al.*, 2011) la plus proche de nos objets. Située sur le versant occidental du mont Zagros, à l'ouest de l'Iran, cette zone se caractérise surtout par des minerais de Zn-Pb. La signature isotopique du SSZ se superpose avec celle des armes n°10268, 10977, 10978, 10988, 27855 et 27856 (Fig. 67 et 68). La mine de Deh-Hossein (Nezafati *et al.*, 2009), située aussi dans la zone de Sanandaj-Sirjan, est particulièrement intéressante puisqu'elle contient des minerais de cuivre et d'étain. D'après une étude, utilisant des datations par ^{14}C , cette mine aurait été exploitée au moins dès le deuxième quart du 2^e millénaire (Nezafati *et al.*, 2009). Comme dans le cas du SSZ, la signature isotopique des armes 10268, 10977, 10978, 10988, 27855 et 27856 se superpose avec celle de la mine. Il en est de même pour 26759 d'Arqa, la pointe de lance longue 11913 et le poignard 27092. Ces deux dernières armes se superposent avec la signature de Deh Hosein uniquement sur le diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Fig. 67). Les armes 6273 et 10279 représentées sur le diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ se superposent à la signature isotopique de quelques fragments de matre et des déchets de travail du cuivre découverts sur le site de Shahr-i-Sokhtah au sud-est de l'Iran (Hauptmann *et al.*, 2003).

Cependant, on note que sur le diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, seule la pointe de lance 10279 demeure compatible (Fig. 68).

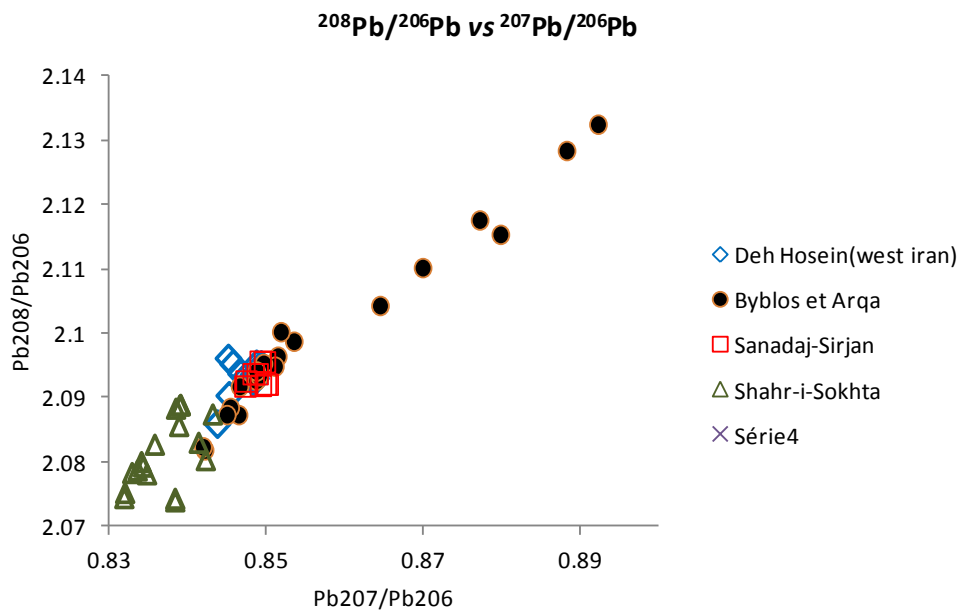


Figure 67 : diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ montrant les signatures isotopiques des minéralisations et du matériel archéologique d'Iran et celles des armes de Byblos et d'Arqa.

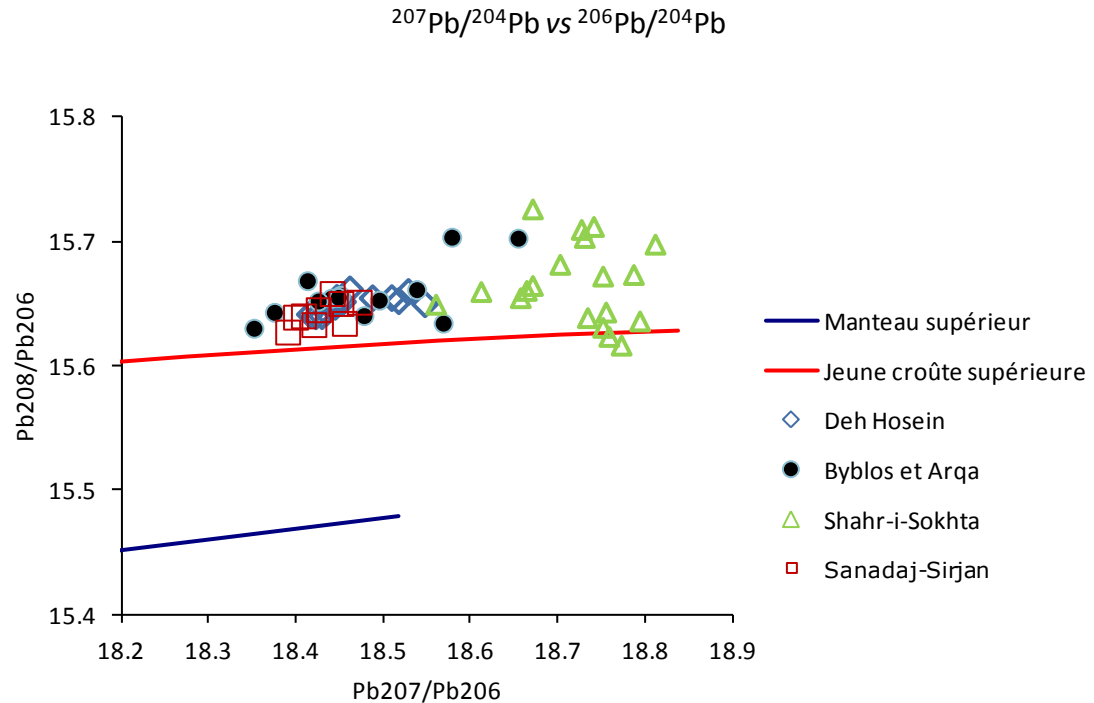


Figure 68 : diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montrant les signatures isotopiques des minéralisations et du matériel archéologique d'Iran et des armes de Byblos et d'Arqa.

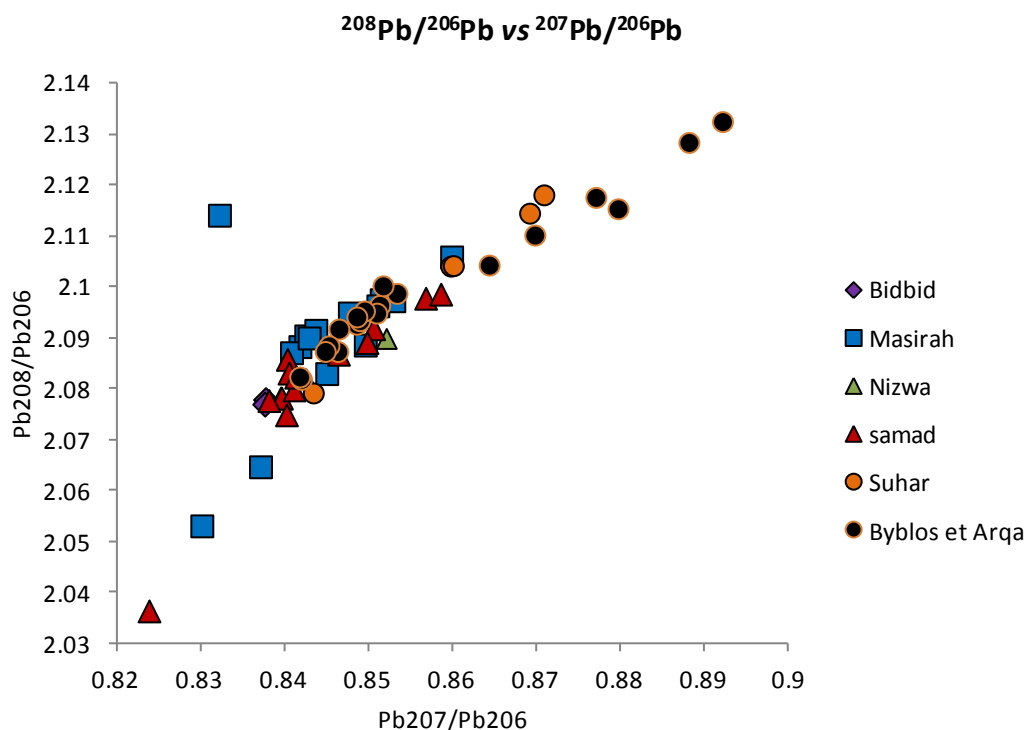


Figure 6g : diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ montrant les signatures isotopiques des minéralisations de Nizwa, Samad, Bidbid, Suhar en Oman, l'île de Masirah et des objets de Byblos et d'Arqa

Oman et l'île de Masirah, située au large de la côte sud-est de la péninsule arabique, présentent à peu près 150 gisements de cuivre. Begemann et *al.* (2010) ont effectué des travaux d'analyse de composition élémentaire et d'isotopes de plomb sur plusieurs régions d'Oman, comme Bidbid, Masirah, Nizwa, Samad et Suhar, où l'exploitation ancienne de cuivre est attestée archéologiquement. En générale, les champs isotopiques de ces cinq régions se recoupent et parfois même se superposent. Le groupe « A » et les armes se superposent au champ isotopique des gisements de cuivre de l'île de Masirah. Les armes 6273, 10268, 10279, 11913, 26759, 27855, 27856 et 27902 se superposent également sur le diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ du champ de la région de Samad (Fig. 69). Par contre, sur le diagramme $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ seules les armes 6273, 10279, 11913 et 26759 s'y superposent (Fig. 70). Sur ce même type de diagramme les armes 11914, 11921 et 10280 se superposent au champ de Suhar. Begemann et *al.* (2010) ont aussi effectué des analyses des isotopes du plomb sur cinquante-et-un objets en cuivre et en alliages cuivreux : quatorze objets, provenant des sites d'Al-Aqir et Maysar, datent de la période d'Umm an Nar (2600-2000 av. J.-C.); trente objets provenant des sites de Al-Akhdar, Al-Wasit, Aztah,

Sarriad ash Shan et Nizwa appartiennent à la période Wadi Suq (2000-1250 av. J.-C.) ; quatre objets en bronze et trois en argent de l'Age du Fer I et II (1250-500 av. J.-C.) ; vingt-trois objets du Bahrein appartiennent à la période Barbar (2050-1900 av. J.-C.) et proviennent du temple de Barbar et des sites de Ali, Al-Nasaria, Hamad, Diraz, Qala'at Al-Barhrein et Saar. Le groupe « A » et les armes 6273 et 10279 se superposent aux champs isotopiques des objets datant des périodes Wadi Suq et Lizq à Oman ainsi qu'aux champs des objets du Bahrein (Fig. 69 et 70). Weeks (1999) a étudié soixante-quatorze objets découverts à Tell Abraç situé dans les Emirats Arabes Unis. Dix-sept de ces objets appartiennent à la période d'Umm an Nar, vingt huit à Wadi Suq et trente à l'Age du Fer (1250-300 av. J.-C.). En général, Le groupe « A » et les armes 6273 et 10279 se superposent bien aux objets de Tell Abraç. Cette compatibilité est particulièrement notable pour les objets appartenant aux périodes de Wadi Suq II (c. 1800-1600 av. J.-C.) et IV (c. 1400-1250 av. J.-C.) ainsi que celle de l'Age du Fer II (c. 800-500 av. J.-C.).

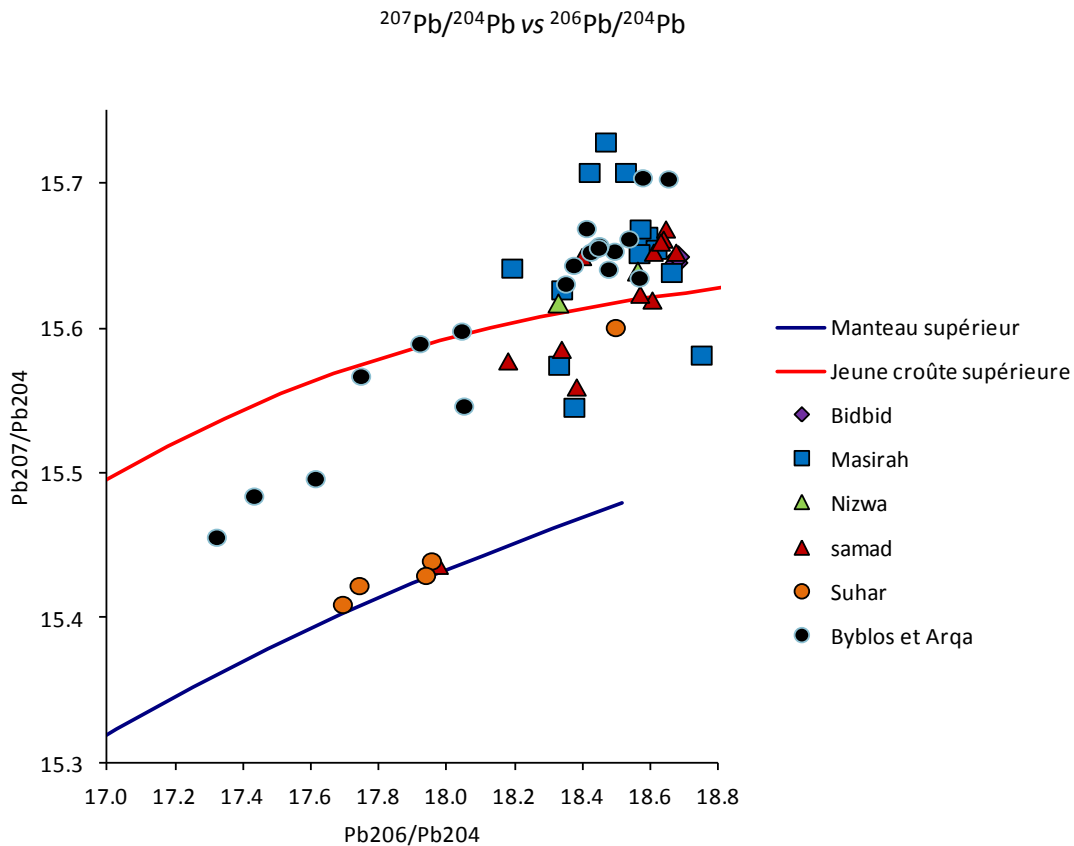


Figure 70 : Diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montrant les signatures isotopiques des minéralisations de Nizwa, Samad, Bidbid, Suhar en Oman, l'île de Masirah et des objets de Byblos et d'Arqa.

La détermination des sources susceptibles de fournir le cuivre pour la fabrication des armes en question dépend de l'ampleur des données disponibles dans la littérature et de la

façon dont les résultats des rapports isotopiques sont traités. Si chaque objet est considéré comme étant un cas unique, alors les armes 6273, 10279, 10977, 11913, 27567, 27092 peuvent provenir de la plupart des sources mentionnées ci-dessus (Anatolie, Jordanie, Iran et Oman). En revanche, la signature isotopique des objets 10268, 10978, 10988, 27855 et 27856 ne correspond qu'à l'Iran et Oman. Les armes 10997 et 11856 se superposent uniquement au champ d'Oman. Cependant, si les regroupements définis précédemment sont considérés comme représentatifs des ensembles cohérents d'objets provenant de la même source, alors le groupe « A » ne se superpose entièrement qu'au champ isotopique d'Oman et possiblement de Faynan dans le cas d'un mélange entre le cuivre du MBS et celui du DLS. Il est important de mentionner que d'après Hauptmann (2007), les mines de Faynan auraient été peu actives durant la période concernée par cette étude. La provenance du cuivre d'Oman constitue donc une hypothèse plausible. Celle-ci est renforcée par les textes cunéiformes qui stipulent que cette partie de la péninsule arabique appelée pays de « Magan » (Weisberger, 1981, d'après Begemann et *al.*, 2010) aurait fourni du cuivre à la Mésopotamie durant le 3^e millénaire et au début du 2^e millénaire (Moorey, 1999 ; 245-246, Begemann et *al.*, 2010). Du cuivre provenant d'Oman aurait pu arriver à Byblos via la Mésopotamie. D'après les textes cunéiformes du premier quart du deuxième millénaire (Michel, 2001, 2007) découverts au Karum de Kanish, l'Anatolie produisait du cuivre mais ne le fournissait pas à la Mésopotamie. Aucune source textuelle n'atteste l'Iran comme un fournisseur de cuivre à la Mésopotamie pour la période étudiée. Cependant, un texte cunéiforme de Gudea, gouverneur de Lagash durant le XX^e siècle av. J.-C. cite la montagne de Kimaš comme lieu d'extraction de cuivre (Moorey, 1999 ; 245). Moorey considère que cette montagne est probablement située entre Jebel Hamrin et le Petit Zab au nord-est de l'Iraq. Selon l'auteur, cette montagne n'était pas une source de cuivre mais probablement un « lieu de relai » pour le cuivre provenant probablement de l'Iran. En raison de la proximité de cette région de la zone du Sanadaj-Sirjan en Iran, cette hypothèse est recevable.

Pour résumer, la concordance entre les données isotopiques, les sources textuelles et la proximité géographique de quelques districts miniers nous permet de proposer quatre sources possibles du cuivre utilisé pour au moins une partie des armes du groupe « A » qui sont l'Anatolie, l'Iran, Faynan, et Oman. A l'ensemble du groupe « A » et les armes 6273 et 10279 ne correspondent que Faynan (mélange du cuivre DLS et MBS) et Oman. D'après les données archéologiques, Oman nous semble pour l'instant la source la plus plausible de cuivre.

IV – Bilan

Chapitre 1 : Savoir-faire des artisans

Chapitre 2 : Apport de l'étude de la technologie à l'archéologie

Chapitre 1

Savoir-faire des artisans

4.1.1- Les moules

La mise en forme de tous les types d'armes étudiés commence par la coulée d'une ébauche. Les vestiges archéologiques et les observations métallographiques permettent de distinguer deux principaux types de moules.

- Les moules en deux pièces sont utilisés pour réaliser des ébauches de géométries simples comme dans le cas des poignards, des pointes de lances à languette rivetée et des pointes de lances à douille⁴⁶ de Type 10 de Philip (1989 ; 96).
- Les moules à pièces multiples sont utilisés pour couler des ébauches de géométries complexes comportant des parties creuses, comme dans le cas des haches fenestrées et de la plupart des pointes de lances à douille.

Les formes des empreintes des moules et la position de l'entonnoir de coulée dans ces moules montrent que les artisans étaient bien conscients de l'importance de la répartition des volumes et des épaisseurs du métal liquide à l'intérieur d'un moule : l'entonnoir de coulée est toujours en connexion avec les empreintes qui correspondent aux parties massives d'une arme. Cette disposition est surtout évidente dans les haches fenestrées et dans les pointes de lances à douille où l'entonnoir est attaché à la lame. De ce fait, la majorité du métal liquide est concentrée dans la partie supérieure du moule. Le reste du métal est situé dans les empreintes de sections minces du collet ou de la douille qui forment la partie inférieure du moule. Le métal en fusion localisé dans les empreintes minces est le premier à se solidifier. Le métal solidifiant en dernier est situé dans les parties massives supérieures comme le centre de la lame et de l'entonnoir. En conséquence, les gaz solubilisés dans le métal durant la fusion, peuvent s'échapper des parties minces via la partie massive et éventuellement par l'entonnoir. Cette disposition réduit le risque

⁴⁶ Il s'agit des pointes de lances à douille n°10274, 10279, 10301 et 10303.

d'obtenir des défauts de fonderie dans les parties minces de l'ébauche, qui peuvent ensuite être soumises à un travail de déformation ou à des contraintes mécaniques importantes. Les conséquences de cette disposition peuvent être observées sur plusieurs armes fabriquées durant les coulées expérimentales. Elles se manifestent par la présence de trous sur la lame et l'entonnoir⁴⁷ et leur absence sur les parties minces du collet ou de la douille.

La pression exercée par le métal liquide contenu dans les parties massives supérieures du moule contribue au bon remplissage des empreintes minces inférieures du moule : comme nous l'avons mentionné dans la partie 3.3.5, la tension de surface qui devient importante dans des empreintes de sections minces pourrait provoquer un mauvais remplissage du métal liquide. Ce phénomène peut se comprendre dans le cas d'une section fine et large par la relation suivante (Campbell, 2004 ; 75-76):

$$P_i - P_e = \gamma / r \quad [1]$$

Où P_i est la pression à l'intérieur du métal, P_e est la pression externe liée à l'environnement du moule, γ est la tension de surface et r le rayon du ménisque formé par le front du métal liquide. Dans ce cas la différence des pressions agissantes ($P_i - P_e$) est en équilibre avec la pression effective causée par la tension de surface. Pour que le métal puisse pénétrer, il faut que la différence des pressions agissantes soit plus grande que la tension de surface :

$$P_i - P_e > \gamma / r$$

Soit :

$$(P_a + \rho gh) - (P_a + P_m) > \gamma / r \quad [2]$$

Où P_a est la pression atmosphérique, ρgh est la pression hydrostatique (ρ la densité du métal, g est l'accélération de la gravité et h est la hauteur du métal liquide dans le moule) et P_m est la pression produite par les gaz dans le moule (l'air dans les empreintes et le gaz rejeté par le métal en fusion). Ainsi, la position de l'entonnoir au dessus de la lame est primordiale puisqu'elle augmente la pression hydrostatique et donc contribue au bon remplissage des empreintes de section mince du moule. La formule [2] montre aussi la nécessité du dégazage du moule pour réduire P_m . L'importance du dégazage a aussi été comprise chez les artisans du Bronze Moyen ; des moules en pierre comportant des événements ont été trouvés à Tell el-Dab'a (Philip, 2006 ; pl. 195, Fig. 78.1), à Byblos (Dunand, 1950 ; pl. 184), à Ebla (Festuccia, 2000 ; fig. 5 et 6) et à Kültepe (Özgüç, 1986 ; pl. 86.2a).

⁴⁷ Les défauts produits par des facteurs extrinsèques au métal comme l'humidité et les gaz dégagés par le moule ne sont pas pris en compte.

Aucun noyau de moule à pièces multiples n'a été trouvé⁴⁸ jusqu'à présent. La fabrication de cette pièce en terre cuite semble être le choix le plus pratique bien que des matériaux comme du bois et de la pierre, ou même du bronze, aient pu être utilisés. Les expérimentations nous permettent de constater que les noyaux en terre cuite sont facilement fabriqués par moulage, facilitant ainsi la reproductibilité des dimensions de ces pièces. De plus, l'artisan peut intervenir avant ou après la cuisson pour appliquer des modifications des dimensions par ajout ou par enlèvement de matière. Finalement, après la coulée de l'objet en alliage cuivreux le noyau peut être facilement éliminé. Ces avantages ne se présentent pas dans des matériaux plus résistants comme la pierre.

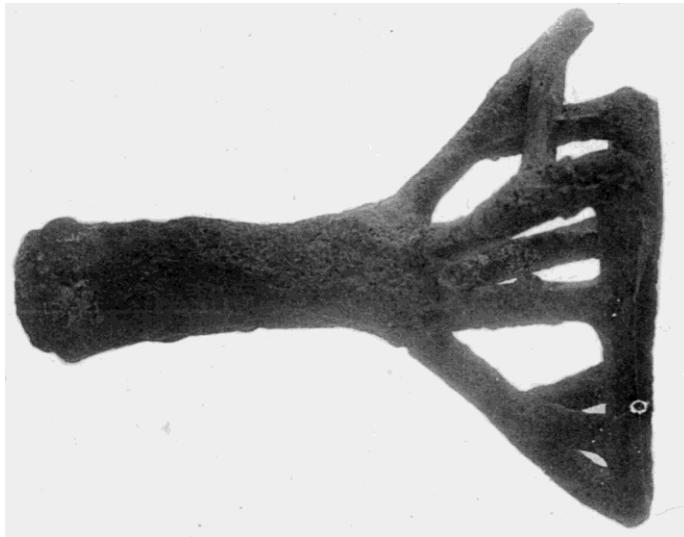


Figure 71 : « support en bronze » découvert dans le dépôt ϕ (Dunand, 1950 ; pl. 76). Sa forme complexe évoque l'utilisation de la technique de cire perdue.

Aucune preuve directe de l'utilisation d'un moule avec la technique à la cire perdue au Bronze Moyen au Levant n'a été mise au jour. Pourtant, cette technique semble avoir été connue au Levant sud durant le chalcolithique (Namdar *et al.*, 2004, Shalev, 1994, 1995). Selon Moorey (1994 ; 271) la technique de la cire perdue a été utilisée en Mésopotamie à partir du 4^e millénaire av. J.-C. En Egypte, les plus anciens objets, probablement fabriqués par cette technique, datent de la IV^e dynastie (Lucas, 1948 ; 215, Ogden, 2009 ; 158). A Byblos, un objet⁴⁹ en alliage cuivreux provenant du dépôt ϕ pourrait avoir été fabriqué par ce procédé (Dunand, 1954 ; 385). N'avons pas examiné directement l'objet. Cependant, la description et le cliché publiés par Dunand (1950 ; pl. 76, 1954 ; 385)

⁴⁸ Selon Davey (1983), un cylindre en terre argileuse trouvé à Tell edh-Dhiba'i en Iraq et datant de 1800 B.C aurait été utilisé comme noyau dans la fonte au sable ; ce qui reste très hypothétique.

⁴⁹ Le numéro d'inventaire de publication de cet objet est 10716 (Dunand, 1950 ; pl. 76, 1954 ; 385).

montrent que l'objet (Fig. 71) présente une géométrie complexe qui pourrait constituer une preuve indirecte de l'utilisation de cette technique de mise en forme : l'objet est constitué d'une tige au bout de laquelle plusieurs branches naissent. Celles-ci sont toutes reliées à leurs extrémités par des traverses. Selon Dunand (1954 ; 385), l'objet, considéré comme un « support en bronze », a une hauteur de 10.6 cm et une largeur, probablement au niveau des traverses, de 8.5 cm. Il mentionne aussi que la tige principale n'est pas creuse. Bien évidemment, cette forme complexe pourrait être atteinte en joignant les différentes parties par soudure ou par brasure.

4.1.2- Le travail de déformation et les recuits

Plusieurs types de déformation ont été observés par les observations métallographiques, comme le martelage, l'ébarbage, le perçage et l'affûtage. Dans la plupart des cas ces travaux ont été interrompus ou suivis par un ou plusieurs traitements de recuit. La première action qui suit la coulée est l'ébarbage. Ce travail consiste à éliminer les bavures⁵⁰ et l'entonnoir de coulée. A cause de ses dimensions relativement importantes⁵¹ le découpage de ce dernier implique des quantités importantes de déformation. Pour éviter de provoquer des ruptures au niveau de la partie en cours de déformation, l'artisan applique périodiquement un traitement de recuit pour adoucir le métal, lui permettant ainsi de continuer la mise en forme. Un chauffage de la partie connectant la lame et l'entonnoir pourrait aussi être appliqué avant et durant la déformation pour adoucir le métal et faciliter le découpage.

Les gestes du martelage, restitués à partir des observations métallographiques, sont caractéristiques d'un travail d'allongement d'une ébauche ou d'un ajustement de sa forme. L'allongement par martelage a été utilisé surtout pour mettre en forme les douilles des pointes de lances faites en moule à pièces multiples ainsi que l'ensemble des pointes de lances à douille du Type 10 de Philip (1989 ; 96). En alternant martelage et recuit, les artisans ont réussi à effectuer 75 à 85% de réduction d'épaisseur pour obtenir des sections

⁵⁰Bavure: pénétration mince de métal dans des fissures ou les joints défectueux du moule ou des noyaux lors de la coulée, d'après *le Dictionnaire Idéologique de Fonderie, 1974*.

⁵¹Les dimensions de l'entonnoir sont souvent manquantes dans les publications. Dans le cas où des illustrations des moules sont fournies, la reconstitution de la largeur et de la hauteur de cette partie est possible. La section du moule au niveau de la connexion entre l'entonnoir et les empreintes du reste de l'ébauche d'arme sont rarement disponibles et donc l'épaisseur de l'entonnoir reste inconnue. La hache 11655 présente une pointe qui n'a pas été mise en forme après le découpage. Elle montre que la partie découpée avait une largeur de 3cm et une épaisseur maximale de 0.5 cm.

fines inatteignables par fonderie (tableau 2 ; p. 149). Nous pouvons constater que l'allongement par martelage permet d'économiser, surtout dans le cas des pointes de lances à douille, la quantité de métal, tout en augmentant sa ténacité⁵². La démonstration suivante nous permet de mieux comprendre cette idée. Soit une douille A, mise en forme par martelage, et une douille B, dans un état brut de fonderie. Les deux douilles sont faites à partir d'un bronze à 10 Wt.% d'étain. La face extérieure de la douille A est en forme de cylindre et sa face intérieur est en forme d'un tronc de cône. La douille A présente une épaisseur maximale de 1200 µm située au niveau de la zone distale. L'épaisseur minimale de 300 µm est située à l'extrémité de la zone proximale. Ces dimensions sont similaires à celles mesurées sur la douille de la pointe de lance longue 11856. La douille B, obtenue par fonderie, présente sur son ensemble la même épaisseur qui est de 1000 µm⁵³. Les faces extérieure et intérieure de cette dernière sont en forme de cylindre. Les deux douilles présentent une hauteur de 20 cm et un diamètre extérieur de 2 cm. Un bronze à 10 Wt.% d'étain a une masse volumique de 8.86 g/cm³ (Amendola, 2010 ; 102). Un simple calcul du volume des deux douilles (douille A= 9.03 cm³, douille B= 11.93 cm³) et ensuite de leur masses⁵⁴ (douille A= 80 g, douille B= 106 g) à partir du volume et de la masse volumique de l'alliage montre que la douille martelée présente approximativement 25% de moins de métal que celle obtenue par fonderie.

L'étude des inclusions de sulfure de cuivre allongées a révélée les orientations des gestes d'allongement :

- uniaxial et oblique par rapport à l'axe long de l'objet pour refermer et allonger les douilles ;
- uniaxial et parallèle à l'axe long de l'objet pour ajuster et allonger les surfaces des joints ;
- uniaxial et parallèle à l'axe long de l'objet pour allonger le fût du rivet ;
- uniaxial et parallèle à l'axe long de l'objet pour allonger la languette ou le talon des poignards et des pointes de lances à languette rivetée.

Cependant cette étude montre aussi qu'il ne faut pas considérer que les gestes des artisans suivent toujours le même schéma. Selon le besoin, l'artisan changeait de geste pour ajuster l'arme en cours de fabrication. Par exemple les douilles des pointes de lances présentent

⁵² Ceci est dû au type de la structure cristalline et à son homogénéisation.

⁵³ Cette valeur correspond à la plus faible valeur d'épaisseur initiale moyenne calculée pour les douilles des pointes de lances longues à partir des inclusions de sulfure de cuivre (tableau 2).

⁵⁴ Nous n'avons pas pris en compte l'hétérogénéité de la structure de la douille B qui présente une porosité, ce qui peut réduire la valeur de sa masse réelle par rapport à sa masse calculée.

dans certains cas une alternance entre martelage oblique et martelage parallèle et/ou perpendiculaire à l'axe de l'objet sans que ce dernier geste soit dominant.

A ces gestes, appliqués pour allonger une pièce métallique, s'ajoutent d'autres qui ont pour but d'ajuster la forme de l'arme. Ceux-ci ont été appliqués pour soigner la forme des languettes, des talons, des pointes des lames, suite au découpage de l'entonnoir de coulée, et pour amincir le tranchant de la lame. L'application d'une ou plusieurs passes de déformation et de recuit sur les lames des poignards et des pointes de lances, présentant des faibles épaisseurs par rapport aux haches⁵⁵, pourrait exprimer une volonté d'augmenter la ténacité de la partie active de l'arme.

Nous ne pouvons pas confirmer si le dernier travail de déformation appliqué sur le tranchant est un affûtage ou un martelage visant à l'amincir. Toutefois, les variations de la structure cristalline au sein d'une même arme montrent que les artisans de Byblos appliquaient différentes opérations de mise en forme dans le but d'obtenir des propriétés mécaniques adaptées au fonctionnement de chacune des parties de l'arme : les parties passives (collet, douille, talon et languette), ayant une structure recristallisée ou dendritique, sont ductiles. Les lames présentent un cœur ductile dans un état brut de fonderie ou recristallisé, et un tranchant dur dans un état écroui. Les parties ductiles offrent une meilleure résistance à la propagation de fissures, par contre elles se déforment facilement. A l'inverse, les parties dures sont résistantes à la déformation plastique, mais sont plus susceptibles d'entraîner une propagation de fissures. L'association entre un tranchant dur et une lame ductile augmente l'efficacité des coups portés par l'arme tout en réduisant le risque d'une cassure qui pourrait rendre l'arme inutilisable.

La méthode employée pour percer les trous de fixation des parties d'emmanchement des poignards, des pointes de lances à douille et des pointes de lances à languette rivetée, est basée sur le même principe. Il s'agit de forer un trou à l'aide d'un poinçon de section circulaire⁵⁶ en posant l'arme sur une matrice tendre, probablement en bois. La détermination des formes des ébauches des armes et des gestes de mise en forme permet d'identifier d'autres outils liés au travail de déformation. Ces outils sont rarement trouvés sur les sites archéologiques levantins du Bronze Moyen. Ceci est probablement dû à la difficulté d'identification de spécimens simples en pierre, à la mauvaise conservation des outils en bois, ou encore au recyclage des outils en alliage cuivreux. Nous distinguons deux types d'enclume pouvant être utilisés dans les opérations de martelage : une enclume cylindrique, probablement en bois dur (Fig. 72 a), a été employée dans la mise en forme des

⁵⁵ Nous rappelons que, à part la pointe de la lame, le tranchant des haches fenestrées n'a subi aucun traitement de recuit.

⁵⁶ Cette constatation se base sur la forme circulaire du trou, le profil évasé ou en double biseau de ses bords.

douilles des pointes de lances (Fig. 38). Les poignards et les pointes de lances à languette rivetée ont probablement été martelés sur une enclume plate. En Egypte ce type de travail s'effectuait sur une enclume plate en pierre, comme le basalte, la diorite ou le granit, fixée sur un bloc de bois (Fig. 72 b). Cette dernière pièce avait pour but d'absorber le choc provoqué par le martelage et donc protégeait l'enclume d'éventuelles cassures. Le travail de martelage des pointes de lances à douille 10274, 10279, 10301 et 10303 exige probablement l'utilisation d'une enclume plane pour aplatir l'ébauche et ensuite d'une enclume cylindrique pour refermer la douille de manière à ce qu'elle conserve une forme permettant une bonne fixation sur la hampe.

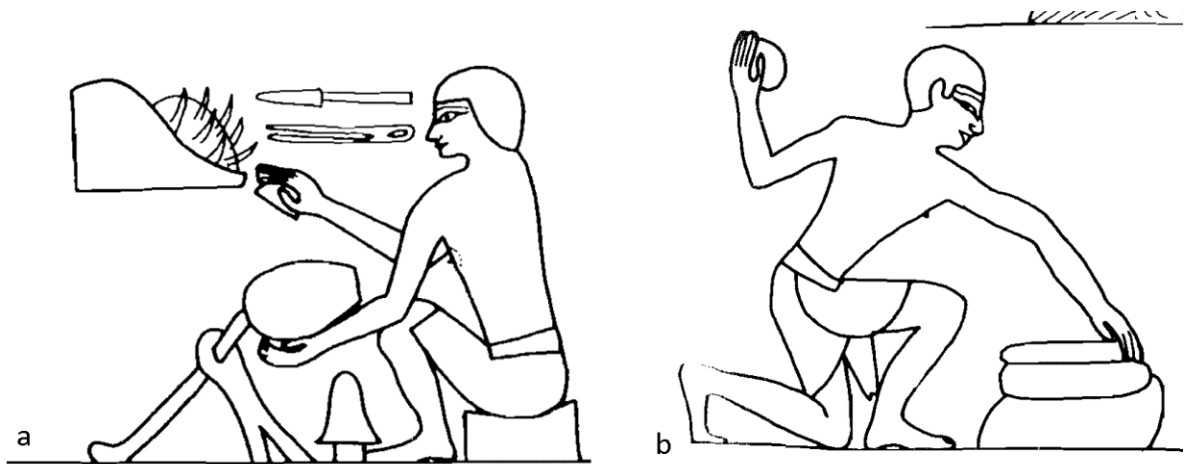


Figure 72 : a- artisan utilisant une pierre plate pour marteler un vase en métal sur une enclume peut-être en bois. Relief de la tombe de Rekh-Mi-Ré (Scheel, 1989 ; fig. 37, d'après Davis, 1943 ; pl. 55) ; b- artisan martelant un plat en métal sur une enclume plate avec une pierre arrondie. L'enclume est constituée d'une pierre placée au-dessus d'un bloc probablement en bois. Relief de la tombe de Rekh-Mi-Ré (Scheel, 1989 ; fig. 29, d'après Davis, 1943 ; pl. 55).

Les outils de percussions utilisés pour l'allongement par martelage doivent remplir la fonction d'un marteau à retreindre. Ceux qui sont utilisés pour ajuster et retoucher les différentes parties des armes se rapprochent plutôt du marteau à planer. Ainsi, les parties actives des outils de percussion ressemblent probablement à la panne de ces deux types de marteaux : dans le premier cas la partie active est fortement convexe et dans le deuxième cas elle est plane ou très légèrement convexe. Selon Scheel (1989 ; 28-31), les artisans égyptiens utilisaient des outils de percussion en pierre arrondis (Fig. 72 b) pour retreindre et plats (Fig. 72 a) pour planer. Ce type d'outillage est représenté sur des reliefs de tombes datant de l'Ancien Empire jusqu'à la période Ptolémaïque en Egypte. La plupart des marteaux en alliages cuivreux pouvant être utilisés pour retreindre ou pour planer

(Deshayes, 1960 ; 296-299) sont postérieurs au Bronze Moyen. Ils proviennent majoritairement de la Grèce et de Chypre.

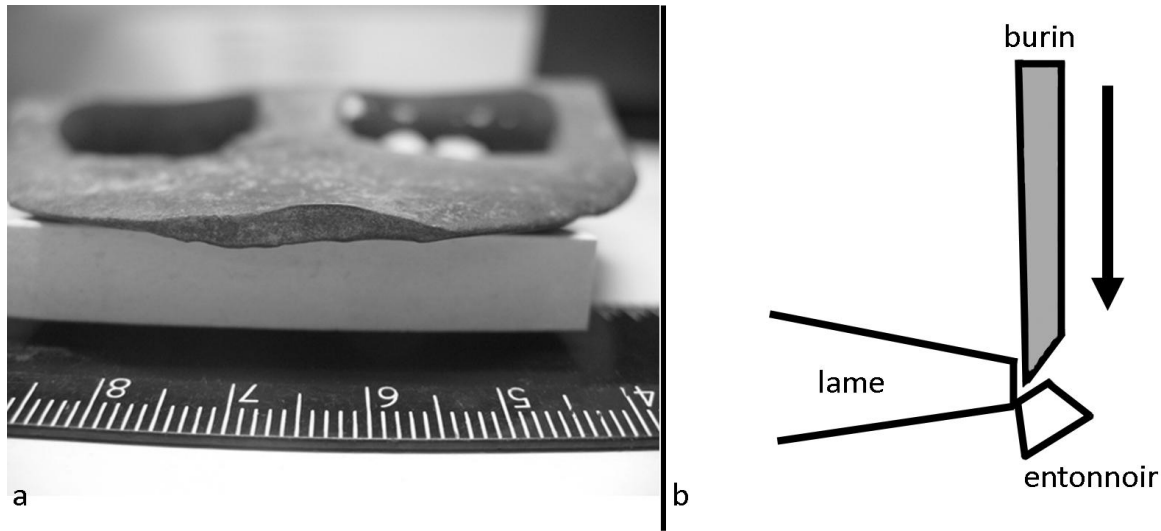


Figure 73 : a- pointe de la lame de la hache fenestrée 11655 aplatie par suite du découpage de l'entonnoir de coulée ; b- schéma représentant le fonctionnement du burin ou ciseau utilisé pour découper l'entonnoir.

Le type d'outil utilisé pour le découpage de l'entonnoir de coulée pourrait être identifié à partir d'une trace de découpe laissée sur la pointe de lame de la hache fenestrée large étroite 11655 (Fig. 73 a). Elle présente un front plat d'une longueur de 3 cm. L'épaisseur maximale de la lame à cet endroit est de 0.5 cm. Ainsi, d'après la forme de la trace de découpe et l'épaisseur du métal découpé nous pouvons identifier l'outil utilisé comme un burin en alliage cuivreux dont la partie active est en biseau (Fig. 73 b). Deux objets pouvant remplir cette fonction ont été trouvés à tell ed-Dab'a identifiés par Philip (2006 ; 123) comme étant des ciseaux (*chisel*). Le premier présente une longueur de 10.4 cm, une largeur de 1.1 cm et une épaisseur de 0.8 cm. Il est fait à partir d'un alliage cuivreux contenant 3 Wt.% d'étain et 1 Wt.% d'arsenic. Le deuxième à une longueur de 11.6 cm, une largeur de 0.7 cm et une épaisseur de 0.6 cm. Il est fait à partir d'un cuivre à 6 Wt.% d'arsenic. Plusieurs burins, sans contexte archéologique précis, ont été découverts à Byblos (Dunand, 1939 ; 152, 153 ; fig. 140 ; 1954 ; 447, 569, fig. 268, 483, 914). Deux burins ou ciseaux de section carrée, provenant de contextes clairs appartiennent au dépôt ζ (Dunand, 1954 ; 254, fig. 278) et ξ (Dunand, 1950 ; pl. 70, Dunand, 1954 ; 386). Celui du dépôt ζ a une longueur de 7.6 cm. Celui du dépôt ξ présente une longueur de 5.7 cm et une largeur maximale de 0.8 cm. Ces dimensions laissent supposer que ces deux outils étaient utilisés dans des tâches plus fines que le découpage de l'entonnoir. Vingt trois objets

qualifiés de burin ou ciseau ont été trouvés sur Tell Arqa (Gernez, 2010 ; pl. 6, 7). Les deux plus robustes, présentant une partie active en biseau, et donc pouvant remplir la fonction en question sont datés du Bronze Ancien IV. Le premier (Gernez, 2010; pl. 6.22), de section rectangulaire, présente une longueur de 13 cm, une largeur de 1.6 cm et une épaisseur de 0.5 cm. Le deuxième (Gernez, 2010; pl. 6.15), de section rectangulaire, a une longueur de 9.2 cm et une largeur de 0.8 cm d'épaisseur.

Les artisans qui ont fabriqué les armes de Byblos ont maîtrisé plusieurs aspects du martelage. Cette maîtrise se manifeste par le travail d'alliages relativement fragiles, les alliages au plomb et les bronzes contenant une proportion d'étain supérieur à 12 Wt.%. Dans ce dernier cas, les expérimentations de Lechtmann (1996) montrent qu'il est difficile d'appliquer plus que 50% de réduction d'épaisseur sur un bronze à 13 Wt.% d'étain sans conduire à sa rupture. Toutefois, en appliquant de petites quantités de déformation, en plusieurs passes, c'est-à-dire que le travail est interrompu par des traitements de recuit, les artisans ont réussi à appliquer au moins 70% de réduction d'épaisseur, comme dans le cas de la pointe de lance à douille longue 27856 (13 Wt. % Sn), et à amincir des douilles jusqu'à 300 µm, comme dans le cas de l'objet n°11856 (14 Wt.% Sn).

4.1.3- La brasure

Parmi toutes les armes étudiées, seules les pointes de lances 10976, 10977, 10978, 10982 et 10997 présentent des brasures. Cette technique a été utilisée pour joindre une ou plusieurs plaques à la douille. Ces armes font partie d'un ensemble de neuf pointes de lances à douille (10976, 10977, 10978, 10979, 10982, 10988, 10989, 10995 et 10997) présentant des plaques sur leur douille et appartenant toutes au dépôt χ . Cet assemblage peut avoir plusieurs fonctions suivant la taille des plaques : dans le cas où les pièces ajoutées couvrent la majorité de la douille (10976, 10977, 10979, 10982, 10995 et 10997) l'assemblage a été probablement réalisé pour serrer et consolider la douille dont la paroi peut atteindre une finesse de 170 µm. Dans les autres cas (10988, 10989), la plaque courte couvrant la douille partiellement pourra servir uniquement à serrer la douille et à empêcher la hampe de sortir suite à un choc.

Les plaques et les pointes de lances à douille présentent des similitudes dans leurs compositions. De plus, elles contiennent des quantités voisines d'inclusions de sulfure de cuivre. La taille et le comportement sous déformation⁵⁷ de ces inclusions est aussi similaire.

⁵⁷ Les inclusions deviennent plates quand elles subissent une déformation bi-axiale.

Tous ces indices pourraient indiquer que les plaques ont été faites avec le même alliage que celui utilisé pour les pointes de lances. Il est possible aussi qu'à l'origine ces plaques constituent les zones proximales des douilles de ces pointes de lances. Elles ont été découpées et appliquées sur les zones centrales et distales pour consolider la douille.

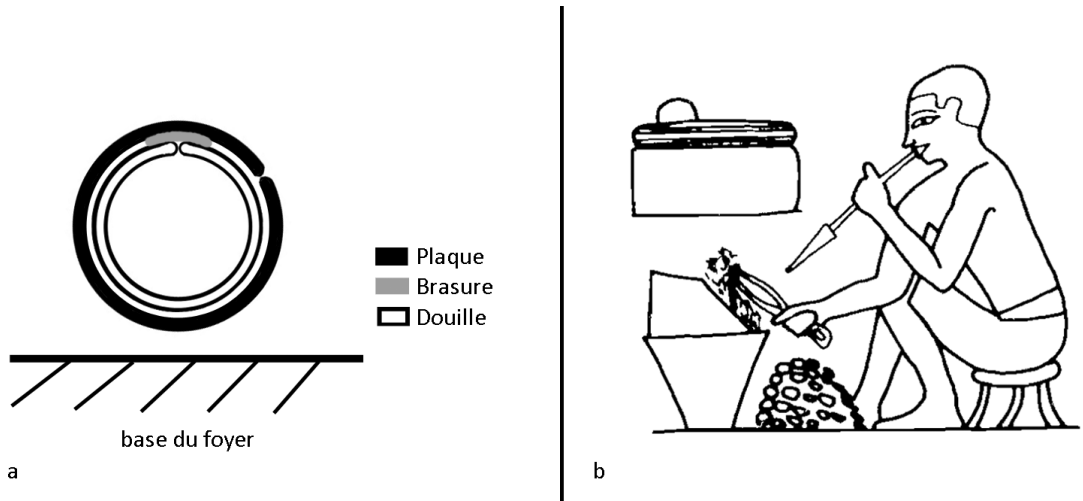


Figure 74 : a- schéma représentant la position de la brasure par rapport à la douille et la plaque. Ces différentes parties observées à partir de leur section transversale indiquent la position de la brasure par rapport au foyer ; b- artisans effectuant un recuit dans un foyer à l'aide d'un chalumeau. Dessin reprenant le décor de la tombe de Rekh-Mi-Ré (Scheel, 1989 ; fig. 31, d'après Davis, 1943 ; pl. 55).

La brasure a certainement été réalisée de la façon suivante : l'alliage probablement en argent-cuivre, sous forme de bande, de fil ou de paillons est fixé⁵⁸ longitudinalement sur le joint de la douille. La plaque est ensuite serrée ou légèrement martelée autour de la douille. L'ensemble est ensuite chauffé dans un foyer pour fondre l'alliage argent-cuivre. L'arme est posée du côté opposé au joint de la douille⁵⁹ dans les braises (Fig. 74 a). Cette position permet à la brasure, une fois qu'elle fond, de s'étaler sur la douille et les plaques sous l'effet de la gravité et de la capillarité (Maryon, 1949). L'artisan pourrait utiliser un chalumeau pour contrôler l'intensité et la localisation du chauffage (Fig. 74 b). La couleur du métal chauffé lui servait comme un indicateur de température de chauffe nécessaire à la fusion de la brasure.

⁵⁸ La fixation pourrait avoir été faite à l'aide d'une colle organique (résine, blanc d'œuf...). Un décapant (ou flux) pourrait avoir été ajouté, cependant nous n'avons détecté aucun élément qui pourrait confirmer l'ajout de cet agent.

⁵⁹ Cette constatation se base sur l'observation de gouttes de brasure relativement éloignées du joint comme dans le cas de l'objet 10976.

4.1.4- Le choix des recettes

Jusqu'à présent, la majeure partie des études effectuées (Philip, 2006, Shalev, 2009, Rosenfeld *et al.*, 1997, Palmieri, Hauptmann, 2000) n'ont pas mis en évidence de relation directe entre les types d'objets et la composition de leur alliage. Selon notre point de vue, ces conclusions pourraient être biaisées par le type de méthode d'analyses employé. En effet, l'utilisation de méthodes de quantification des éléments absolues comme le AAS et le ICP-OES (Shalev, 2009, Palmieri, Hauptmann, 2000) autorise une comparaison des résultats entre différents objets à la seule condition où les échantillons analysés sont totalement dépourvus de corrosion. D'autre part, la relation objet/composition ne peut être établie que dans le cas où les recettes employées sont standardisées par rapport au type d'objet. Cependant, d'après les données analytiques actuellement disponibles, cette hypothèse semble improbable pour la période Bronze Moyen. Ainsi, dans ce travail nous n'avons pas cherché à établir de relation entre composition et objets. Afin de gagner en pertinence, nous proposons d'étudier l'association entre le type de recette, présentant une certaine variabilité dans la composition des alliages, et les propriétés (mécanique, esthétique...) ainsi que la valeur (matérielle et symbolique) que l'artisan aurait voulu conférer à son objet.

La plupart des cuivres à l'arsenic utilisés présentent un bon équilibre entre déformabilité et dureté de par les teneurs en arsenic comprises entre 1.5 et 7 Wt.% (Northover, 1989, Budd, Ottoway, 1991, Lechtman, 1996). Ces recettes reflètent la volonté des artisans de fabriquer des armes relativement malléables à tranchant dur, et donc très efficace, tout en réduisant le risque de fissurations durant le travail de déformation. Ce choix fonctionnel se manifeste aussi par l'utilisation de bronzes contenant entre 7 et 12 Wt.% d'étain. Parmi les différents bronzes, cette gamme de recette correspond à la plus grande fluidité quand l'alliage est fondu (Amendola, 2010). Elle présente le meilleur équilibre entre déformabilité et dureté (Lechtman, 1996, Piccardo, 2004). Cette description ne s'applique pas sur les bronzes contenant plus de 12 wt.% d'étain. Par rapport à la gamme de bronze précédente, la valeur supérieure conduit à un alliage moins fluide et plus fragile (Amendola, 2010) ; il est plus difficilement déformable et présente un risque important de fissuration et donc de rupture⁶⁰. Les propriétés mécaniques et la coulabilité de cet alliage ne justifient pas alors son utilisation. La température de fusion relativement basse pourrait être un facteur favorisant l'utilisation. Cependant l'association entre cet alliage et certains types d'armes semble indiquer que le coût et la couleur jouent un rôle principal dans la sélection de telles recettes.

⁶⁰ Des fissures ont été observées dans la plupart des structures cristallines des pointes de lances à douille longues et des poignards à double nervure.

Les bronzes à plus de 12 Wt.% d'étain ont majoritairement été utilisés dans les pointes de lances à douille longues et dans les poignards à double nervure (Fig. 47). Les pointes de lances longues constituent les armes les plus lourdes de notre corpus (annexe 1 : T.a. 2 à 6). La recette utilisée pour ces armes devait être relativement couteuse par rapport aux autres bronzes du fait qu'elle utilise le plus d'étain qui est plus cher que le cuivre⁶¹ (Dercksen, 1996 ; 195, Joannès, 1997 ; 99-100, Monroe, 2005 ; 176, Powell, 1996). La quantité de métal associée à la recette utilisée permet d'avancer que les pointes de lances à douille longues sont les armes les plus couteuses parmi tous les types d'armes étudiés. Etant donné que la couleur d'un bronze dépend sa teneur en étain, nous pouvons postuler que les différentes gammes de bronzes pourraient être distinguées par leurs couleurs. Ainsi les artisans auront utilisé les bronzes de 12 à 15 Wt.% d'étain dans le but de marquer, par l'association entre le coût et la couleur du métal, le caractère relativement prestigieux des pointes de lances à douille longues par rapport à d'autres armes. Le même raisonnement s'applique aux poignards à double nervure qui se distinguent des autres poignards par leur poids (annexe : T.a. 3), leur recette et leur décoration. Les analyses des compositions montrent que la pratique d'association entre ces deux types d'armes et les bronzes à teneurs élevées en étain est attestée au moins à Byblos, Arqa et à Tell ed-Dab'a (Philip, 2006 ; 212-213). Rosenfeld *et al.* (1997) ont lié l'utilisation de ces bronzes fortement chargés en étain à des objets à caractère ornemental ou cultuel du Bronze Moyen. Moorey (1994 ; 253) a remarqué qu'avant la moitié du 2^e millénaire les bronzes à teneur moyenne et élevée en étain étaient réservés aux objets de prestige tandis que les cuivres et les cuivres à l'arsenic étaient utilisés dans la fabrication des objets communs comme les outils. Philip *et al.* (2003), ayant analysé plusieurs types d'objets de Pella en Transjordanie datant de différentes périodes, ont observé une tendance pour l'utilisation de ces bronzes dans les objets tranchants et décoratifs. Ils associent l'utilisation à une recherche de couleur particulière et de dureté. L'étude des alliages cuivreux utilisés à Tell ed-Dab'a a mené Philip (2006 ; 214) à considérer que l'utilisation du bronze pour augmenter la valeur d'un objet est une caractéristique du Bronze Moyen I. L'analyse des armes de Byblos montre que la différenciation entre les différents alliages est plus subtile. Elle permet de distinguer entre les **recettes à caractère prestigieux** représentées par les *bronzes riches* (12-15 Wt.% Sn) et les **recettes à caractère fonctionnel** regroupant les *bronzes intermédiaires* (6 et 12 Wt.% Sn) et les cuivres à l'arsenic (1.5 à 7 Wt.% As). Etant donné que ces deux derniers alliages sont utilisés dans les mêmes types d'armes, aucune préférence, au niveau des propriétés mécaniques, n'a été remarquée pour les *bronzes intermédiaires* par rapport aux cuivres à l'arsenic.

⁶¹ Cette constatation est basée sur des sources textuelles d'Anatolie, de Mésopotamie et de la Syrie datant du Bronze Ancien IV jusqu'au Bronze Récent.

Un troisième type de recette comportant les alliages au plomb peut être distinguée. Les artisans avaient compris l'incompatibilité de ces alliages avec le travail de déformation. Ils l'ont donc réservé aux objets utilisés dans un état brut de fonderie comme les haches fenestrées étroites. Nos expérimentations, ainsi que l'analyse des exemplaires de Byblos, montrent que l'utilisation de ces alliages n'est pas essentielle au succès de la mise en forme de ces armes. Durant le Bronze Moyen, comme quasiment en toutes périodes, le plomb était moins cher que le cuivre et l'étain (Joannès, 1997 ; 99-100, Powell, 1996, Monroe, 2005 ; 176, Moorey, 1999 ; 295). Il est donc envisageable qu'il soit ajouté dans des teneurs importantes (6 à 24 Wt.%) pour économiser l'emploi d'autre ingrédient. De ce point de vue, les alliages au plomb peuvent être considérés comme des recettes économes. Selon Moorey (1999 ; 293) le plomb ($\rho=11.35 \text{ g.cm}^3$) pourrait avoir été ajouté à un alliage cuivreux⁶² ($\rho<10 \text{ g.cm}^3$) pour augmenter le poids d'un objet. Cependant, la variation des dimensions des haches fenestrées archéologiques (annexe 1 : T.a. 2) ne permet pas de confirmer ces propos. De même, comme la différence relative de masse volumique entre le cuivre et le plomb n'est que de 20% environ, il n'est pas certain que l'influence réelle d'une addition de plomb, même de 24%, sur la masse volumique de l'alliage, qui est donc de l'ordre de 5%, puisse être perçue par ces hommes. Ainsi, dans l'état actuel de nos connaissances, nous proposons que les alliages au plomb utilisés dans les haches soient considérés comme des **recettes économes**.

La propreté du cuivre constituait probablement un critère important dans le choix d'une certaine recette plutôt que d'une autre. Les traitements d'images effectués (Fig. 42) montrent que des cuivres propres sont associés aux pointes de lances à douille longues⁶³. Les observations métallographiques permettent d'étendre cette constatation aux poignards à double nervure⁶⁴. Ainsi, une relation directe entre le cuivre propre et les *bronzes riches* peut être établie. L'emploi des cuivres propres dans ces recettes relève d'un choix technique : les bronzes à plus de 12 Wt.% d'étain sont difficiles à mettre en forme par déformation. Ils doivent être travaillés en effectuant des petites passes de martelage suivies par des recuits permettant de complètement adoucir le métal et donc d'éliminer l'écrouissage de la structure cristalline. Les études précédentes (Andrieu *et al.*, 2000, Pernot, Montheillet, 1994, Pernot 2000) ont montré que les inclusions augmentent le risque de fissuration induite par la déformation et diminuent la capacité de recristallisation par le traitement de recuit. Ainsi les artisans ont tout intérêt à utiliser des cuivres propres dans des bronzes qui sont difficilement déformable pour réduire les risques de fissuration et faciliter la recristallisation.

⁶² Cette réflexion concerne la masse volumique (ρ) des alliages cuivreux révélés par cette étude.

⁶³ La pointe de lance 10336 constitue la seule exception du fait qu'elle contient une proportion importante de nodules de plomb.

⁶⁴ Le poignard 9031 est exclu de cette observation du fait qu'il est fait d'un alliage au plomb.

Les analyses des isotopes du plomb montrent que les cuivres sales, comme ceux utilisés dans les pointes de lances avec brasure et les cuivres propres utilisés dans les pointes de lances à douille longues proviennent très probablement de la même source⁶⁵. La plupart des exemplaires de ce type de pointes de lances longues (L 5. A. a de Gernez ou Type 2 de Philip) a été découverte à Byblos (Gernez, 2007 ; 351-351, Philip, 1989 ; 89). Les pointes de lances avec brasure proviennent toutes du même dépôt. Leurs lames présentent une décoration caractéristique de Byblos consistant en une double rainure d'une part et d'autre de la nervure. Nous pouvons émettre l'hypothèse que l'ensemble de ces pointes de lances à douille a été produit localement. La concentration des fragments de moules autour de l'atelier dit de « bijoutier » (Dunand, 1954 ; 651) du *temple aux obélisques* permet d'envisager l'existence d'un seul atelier ou d'une zone d'ateliers de bronziers dans la ville à cette période (partie 1.4.2.3). Dans le cas où la production dépendait de l'institution religieuse, il serait possible de proposer le modèle suivant : au Bronze Moyen I, les artisans de l'atelier du *temple aux obélisques*, en effectuant des essais de martelage et de recuit, triaient leurs cuivres suivant leurs comportements. Le cuivre sale était utilisé dans les recettes à caractère fonctionnel et le cuivre propre était réservé aux recettes à caractère prestigieux pour lesquelles l'alliage est plus difficile à mettre en forme par déformation. Bien évidemment, le nombre d'exemplaires étudiés, l'imprécision du cadre chronologique et des contextes archéologiques du site, nous incitent à rester prudents quant à la confirmation de ce modèle. Cependant, ces résultats pourraient constituer une proposition plausible pour interpréter la signification des différentes qualités de ce métal mentionnées dans des sources textuelles Syrienne et Mésopotamienne (Dercksen, 1996, Joannès, 1997, Michel, 2001, 2008). Cette proposition constitue une piste de réflexion qu'il serait intéressant d'approfondir à l'avenir.

⁶⁵ Nous rappelons que des armes appartenant aux dépôts β , λ , ζ , ι et χ contiennent du cuivre provenant d'une source unique ou du même mélange de sources.

Chapitre 2

Apport de la technologie à l'archéologie

4.2.1- Apport de l'étude technologique à la typologie

Jusqu'à présent, les critères technologiques n'ont été abordés que très sommairement dans les études typologiques concernant les armes du Levant. Le manque d'informations détaillées sur les différents aspects de la mise en forme des alliages cuivreux au Levant a empêché l'établissement de relations directes entre le type d'arme et la technique de fabrication.

Dans ce travail, les typologies⁶⁶ (Gernez, 2007, Philip, 1989) déjà établies constituent la base de toute comparaison entre les différents résultats obtenus par l'étude de chaque objet. Inversement, ces mêmes résultats, portant majoritairement sur la technologie, ont été confrontés aux classements typologiques basés sur la morphologie. Nous discuterons uniquement des cas où l'étude technologique apporte des informations supplémentaires à ces classements. Il est intéressant de croiser les résultats des diverses typologies (*techno-*, *morpho-*) dans le cas des pointes de lances à douille.

Les études technologiques des pointes de lances à douille permettent de distinguer deux techno-types principaux dont la mise en forme est fondamentalement différente.

- 1- Les pointes de lances à douille dont l'ébauche de forme complexe est obtenue par coulée dans un moule à pièces multiples (Fig. 38). Leur douille, en forme de tronc de cône est martelée autour d'une enclume cylindrique ou conique. Elles sont désignées ici sous le terme "Techno-type 1".
- 2- Les pointes de lances dont l'ébauche est obtenue par coulée dans des moules en deux pièces. L'ébauche est entièrement aplatie par martelage (Fig. 41) sur une enclume plate. La partie destinée à former la douille est ensuite repliée, probablement autour de la hampe ou d'une enclume cylindrique ou conique. Elles

⁶⁶ Dans ces travaux, le classement des armes est basé principalement sur des critères morphologiques.

sont désignées ici sous le terme “Techno-type 2” et correspondent au Type 10 de Philip (1989 ; 97-98).

Les pointes de lances du « Techno-type 1 » sont présentes sur les quatre sites étudiés. Jusqu’à présent, au moins 400 exemplaires ont été trouvés dans le Levant, en Mésopotamie, en Arabie Orientale, en Iran, à Kültepe en Turquie, et dans le delta du Nil (Gernez, 2007). Bien que quelques exemplaires puissent dater de la fin du 3^e millénaire, la plupart de ces armes sont attribuées au 2^e millénaire.

Parmi les quatre sites étudiés, seul Byblos a livré des pointes de lances du « Techno-type 2 ». Tous les exemplaires (10274, 10279, 10283⁶⁷, 10301 et 10303) ont été trouvés dans le dépôt β. Les analyses effectuées sur quatre pointes de lances de ce techno-type montrent qu’elles ont été réalisées à partir de cuivre à l’arsenic. Outre les pointes de lance de Byblos, nous avons répertorié dix-sept exemplaires répartis sur une large zone géographique : au Levant Sud deux exemplaires datés du Bronze Ancien IV ont été découverts à Meggido (Guy, 1938 ; pl. 86.3) et à Kihrbet Iskandar (Richard, 2006). Un autre exemplaire, trouvé à Tell Sasa (Ben-Arieh, 2004 ; 16), appartient au Bronze Moyen I. Dever (1975 ; 24, fig. 1.3) a publié un exemplaire provenant probablement de ‘Ain es-Samiyeh dans contexte archéologique imprécis. En Syrie, trois pointes de lances de ce techno-type ont été découvertes à Hama (Fugmann, 1958 ; pl.10), à Tell Brak (Philip, 1989 ; 98) et à Chagar Bazar (Mallowan, 1937 ; fig. 13). Elles sont datées de la fin du 3^e millénaire ou du début du 2^e millénaire. Kültepe (Erkanal, 1977, pl.16.19, Özgüç, 1950 ; pl.63) en Anatolie a livré trois exemplaires. Un autre exemplaire a été trouvé sur le site de Kamam-Kalehöyük (Omura, 1996 ; 130, fig. 18.3) situé dans la même région. Un exemplaire datant du Bronze Moyen a été découvert à Tell Yelkhi (Müller-Karpe, 2004 ; 87, pl. 134) au Nord de la Mésopotamie. Le site de Suleimeh, situé dans la même région que le site précédent, a livré un exemplaire qui pourrait dater de la fin du 3^e millénaire (Müller-Karpe, 2004 ; 36, pl. 47). Trois exemplaires datant de la fin du 3^e millénaire ont été découverts sur le site de Barbar dans l’actuel Bahrein (Højlund, 2003 ; 258, 259, fig. 661, 667, 669). Un autre exemplaire, également de l’Arabie Orientale, provient de Jebel Hafit (Cleuziou, 1981 ; 288, fig. 11.1) dans l’actuel Emirat d’Abu Dhabi et pourrait dater de la fin du 3^e millénaire ou du début du 2^e millénaire. La date reculée de la plupart des exemplaires corrobore la proposition de Philip (1989 ; 97) de considérer le « Techno-type 2 » comme une forme primitive des pointes de lances à douille qui aurait probablement précédé le « Techno-type 1 ». Ces deux techno-types sont aussi attestés au cours du Bronze Moyen⁶⁸. Si la proportion d’exemplaires trouvés de

⁶⁷ Le numéro d’inventaire de publication de la pointe de lance 10283 est 8286.

⁶⁸ Le dépôt β de Byblos présente les deux techno-types.

chaque techno-type reflète la réalité de la production⁶⁹ au Bronze Moyen I alors le « Techno-type 1 » aurait été le plus prisé. La forme de la douille de ce dernier aurait contribué à sa diffusion et à son succès : La partie supérieure de la zone distale de la douille du « Techno-type 1 » constitue un creux « fermé » dépourvue de joint (Fig. 40) où le bout de la hampe peut s'insérer. Cette disposition empêche la dislocation de la hampe suite à un choc. Les douilles du « Techno-type 2 » ne présentent cette configuration. Leur forme en plaque repliée ne permet pas de maintenir la hampe en place durant utilisation sans l'ajout d'une consolidation supplémentaire (e. g. fil enroulé sur la douille).

Parmi les exemplaires du « Techno-type 1 », un groupe cohérent pourrait être différencié du reste de l'ensemble des pointes de lances de Byblos. Ce groupe comprend les pointes de lances du dépôt χ (10976, 10977, 10978, 10982, 10997) présentant des douilles et des plaques assemblées par brasure ainsi que des compositions similaires. Nous considérons ces pointes de lances comme une variante du « Techno-type 1 » en raison du rôle de la plaque ajoutée servant à consolider la douille fine et de la méthode d'assemblage utilisée qui est permanente⁷⁰. Cette variante sera désignée par le terme « Techno-type 1.b », alors que les autres pointes de lances constituent le « Techno-type 1.a » (Fig. 75). Selon la typologie de Gernez (2007 ; 358-359) les pointes de lances 10976, 10977, 10982 et 10997 appartiennent au « Type L 5.C.a ». Les lames de ces pointes de lances (Tableau 4) sont généralement plus grandes que celles des autres pointes de lances de Byblos (Tableau 5) appartenant à ce type⁷¹. Dans le chapitre précédent nous avons émis l'hypothèse que les plaques ajoutées constituaient à l'origine la zone proximale et une partie de la zone centrale de la douille. Si cela s'avère vrai, les objets 10976, 10977, 10982 et 10997 auraient tous des longueurs excédant 20 cm (Tableau 4) et pourraient donc être classés avec les pointes de lances à douille moyennes. Nous pouvons également ajouter à ce groupe les pointes de lances 10979, 10988⁷², 10989, 10991, 10995 appartenant au dépôt χ . Cet ensemble forme un groupe cohérent morphologiquement et technologiquement. Bien évidemment, le manque global d'analyses sur les pointes de lances à douille ne permet pas de situer le « Techno-type 1.b » dans un contexte régional particulier ni dans un cadre chronologique plus large que celui des dépôts d'offrandes de Byblos.

⁶⁹ Les pointes de lances des deux techno-types sont souvent trouvées dans le même type de contexte archéologique comme les tombes et les dépôts.

⁷⁰ Ceci est dû à la diffusion de la brasure dans la plaque et la douille.

⁷¹ Malgré les différences morphologiques de ce type Gernez (2007; 358), a préféré ne pas le subdiviser à cause de l'absence de pertinence culturelle ou chronologique.

⁷² Cette pointe de lance est déjà classée par Gernez (2007; pl. 423) sous le type L 5.B.a2.

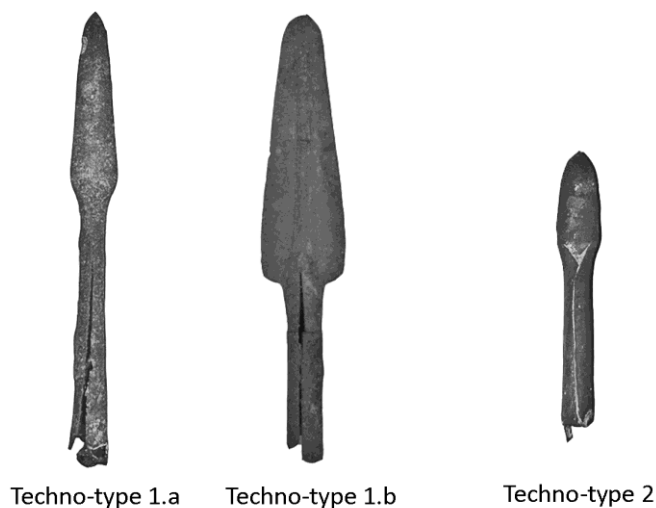


Figure 75 : illustration montrant les différents techno-types proposés. Le « Techno-type 1.a » est représenté par la pointe de lances à douille 11200 ; le « Techno-type 1.b » par le n°10977 ; le « Techno-type 2 » par le n°10279.

Dimensions des pointes de lances à douille avec brasure et plaques

Dimensions	Longueur totale (mm)	Longueur lame (mm)	Largeur lame (mm)	Epaisseur lame (mm)	Poids (g)	Longueur claculée* (mm)
Moyenne	176	116	35	9	68	243
Max	188	119	42	10	91	265
Min	160	114	31	9	49	219

*Longueur claculée: est la somme de la longueur de la douille et des plaques ajoutées

Tableau 4 : Tableau 1 : dimensions des quatre pointes de lances à douille courte (10976, 10977, 10982, 10997) présentant des brasures et des plaques ajoutées.

Dimensions des pointes de lances à douille sans brasures et plaques

Dimensions	Longueur totale (mm)	Longueur lame (mm)	Largeur lame (mm)	Epaisseur lame (mm)	Poids (g)
Moyenne	172	84	24	7	62
Max	197	90	26	6	80
Min	155	78	20	8	52

Tableau 5 : Tableau 2 : dimensions des cinq pointes de lances à douille courte (10277, 10280, 10322, 10324, 10810) dépourvues des brasures et des plaques ajoutées.

4.2.2- Armes de combat ou objets de prestige ?

Les observations métallographiques montrent que les armes présentent généralement un tranchant durci par écrouissage. Cet état contraste avec le reste de l'objet plus malléable. Bien qu'aucune trace d'utilisation (encoches, fissures, déchirures) n'aient été répertoriées, nous pouvons émettre l'hypothèse que la plupart de ces armes étaient réalisées dans le but d'être employées dans un éventuel combat. En effet, le mode d'utilisation d'une arme dans un combat détermine la création ou non de traces d'usage. Par exemple, ces traces sont souvent retrouvées sur les parties actives des épées en alliage cuivreux de l'Age de Bronze en Europe servant à la fois pour donner et parer des coups. La situation est différente avec les haches, les pointes de lance et les poignards dont la partie active sert, en principe, uniquement à porter des coups. Ainsi, l'absence de traces sur la plupart des armes du Bronze Moyen n'est pas surprenante d'autant plus que la guerre n'était pas nécessairement une activité journalière et que probablement une grande partie des armes de guerre n'ont jamais servi directement dans un combat.

Les armes en alliages cuivreux sont des « outils » de combat et des objets de valeur matérielle. L'un ou l'autre de ces aspects pourrait être plus ou moins mis en valeur selon le contexte dans lequel les armes sont déposées. Dans les tombes dites « de guerrier » les armes sont emmanchées et regroupées dans un ensemble constituant la panoplie du guerrier. Pour ce qui est de l'usage, il est probable que les pointes de lances courtes sont utilisées dans les combats à « longue » distance, les pointes de lances longues, lorsqu'elles sont présentes, constituent les armes à portée moyenne ; les haches et les poignards sont utilisés dans le combat de corps à corps. Dans les dépôts cet assemblage n'existe pas. Ce type de contexte peut comporter des armes non finies, comme la hache 11655, des armes qui n'ont jamais étaient emmanchées comme dans le cas des pointes de lances rivetées (Gernez, 2007 ; 375). Dans ce cas, l'accent peut être mis sur la valeur matérielle de l'objet en tant qu'affichage d'un statut, sans que soit exclue la valeur symbolique. La variabilité de l'assemblage des objets en alliages cuivreux⁷³ retrouvés et la présence d'armes cassées⁷⁴, non finies⁷⁵ et repliées⁷⁶ dans les *dépôts d'offrandes* semble confirmer ces propos. Dans ce cadre il n'est pas invraisemblable d'imaginer que les adorateurs montraient leur dévotion aux divinités par la valeur des objets qu'ils offraient. La présence de séries constituées du

⁷³ Nous donnons à titre d'exemple le dépôt regroupant des armes, des outils, des rebuts de coulées et des bandes repliées, tous faits en alliages cuivreux (Dunand, 1954 ; 339-344).

⁷⁴ Il s'agit des haches fénestrées comme 6271, 6273, 6281, 10998.

⁷⁵ La mise en forme de la hache 11655 n'a pas été complétée.

⁷⁶ Cette action a été observée uniquement sur le poignard 10819 publié dans Dunand (1954) sous le numéro 9210.

même type d'armes dans un même dépôt, comme les pointes de lances du « Techno-type 2 » dans le dépôt β ou du « Techno-type 1.b » dans le dépôt χ , renforce cette hypothèse. Chaque série est constituée d'armes qui sont probablement fabriquées et acquises en même temps. Il est probable qu'elles aient été offertes par la même personne, ou par le même groupe, qui a voulu faire monter la valeur de l'offrande en augmentant la quantité des objets en alliages cuivreux.

Philip (2006 ; 231, 1989 ; 151, 152), après avoir étudié la répartition des armes dans les tombes, a démontré qu'elles sont réservées à un groupe restreint de la population. En se basant sur des représentations graphiques et sur des preuves associant ces objets aux divinités, il propose de considérer les armes découvertes dans les dépôts et les tombes comme appartenant à un groupe au statut social élevé. Selon notre point de vue, l'existence d'exemplaires réalisés entièrement en métaux précieux⁷⁷ ou simplement décorés, montre le caractère prestigieux associé à ces armes.

Plusieurs tentatives ont été mises en œuvre pour déterminer les différents « statuts symboliques »⁷⁸ des types d'armes en alliages cuivreux. Philip (1989 ; 151-152), a tenté de démontrer, sur la base de l'iconographie des reliefs de Serabit el Khadim (Gardiner *et al.*, 1955), que les haches fenestrées étroites sont associées à des personnes de rang social élevé, tandis que les pointes de lances étaient uniquement des armes fonctionnels utilisés par les soldats. Selon l'auteur, ceci se manifeste aussi par la présence systématique des haches et des poignards dans les tombes dites « de guerriers » alors que les pointes de lances à douille sont parfois absentes. Shalev (2009) a comparé, sur la base des compositions des alliages, différents types d'armes du Bronze Moyen découverts au Levant Sud et en Egypte. Ses résultats ne lui ont pas permis d'établir une relation directe entre recette d'alliages et type d'arme. Cependant, la différence, dans le degré de contrôle des teneurs des ingrédients utilisés dans les recettes, l'a emmené à proposer l'idée que les haches fenestrées étroites et les poignards à lame décorée avaient probablement plus de valeur que les pointes de lances à douille. Caspi *et al.*, (2009) ont effectué des analyses par diffraction neutronique sur des haches fenestrées larges provenant de tombes du site d'Enot Shuni en Palestine. D'après leurs résultats, ces armes n'ont subi aucune déformation plastique. Ils déduisent, qu'à la différence des haches fenestrées étroites, les haches

⁷⁷ Nous donnons à titre d'exemple les armes décorées par des feuilles d'électrum et d'argent de la tombe 14.14 d'Arqa et les armes supposées en métaux précieux du *dépôt aux ors* du temple aux obélisques à Byblos (Dunand, 1958 ; 694-695).

⁷⁸ Le terme « statut symbolique » est utilisé ici pour désigner les fonctions et les messages que peuvent porter les différents types d'armes. Un type donné d'arme pourrait être uniquement fonctionnel et donc ne pas porter de message à caractère social. A l'inverse, il pourrait se différencier d'autres types par sa valeur et pourrait refléter un statut social, un signe de pouvoir ou une marque de prestige. Ainsi le « statut » du premier sera plus bas que celui du second.

fenestrées larges ne sont pas des armes fonctionnelles. Celles-ci étaient un symbole du statut des personnes avec lesquelles elles étaient enterrées.

L'existence du concept d'arme de prestige est évidente à Byblos par la présence d'exemplaires du même type d'arme, comme les haches fenestrées larges, produites à partir de métaux précieux et en alliages cuivreux. Contrairement aux armes en alliages cuivreux, les exemplaires en métaux précieux n'étaient certainement pas destinés à être utilisés comme armes fonctionnelles durant un combat et leur rôle se limitait à l'exhibition du prestige.

L'association entre recette d'alliage et type d'arme montre qu'à Byblos les armes en alliages cuivreux n'avaient pas toutes la même valeur symbolique et/ou matérielle. Les pointes de lances à douille longues et les poignards à double nervure se distinguent par leur coût élevé et leur couleur (partie 4.1.4). Elles pourraient donc être considérées comme plus prestigieuses que le reste des armes étudiées. Ceci montre qu'à la différence des observations de Philip (1989 ; 152) et de Shalev (2009) les pointes de lances n'avaient pas nécessairement une valeur symbolique et matérielle inférieure à celles des haches fenestrées et des poignards à lame décorée. En effet, pour effectuer de telles comparaisons il est nécessaire de distinguer les pointes de lances courtes des pointes de lances longues. Les premières peuvent être utilisées comme armes de jet et donc pourraient être perdues durant un combat. Ainsi, il n'est pas surprenant d'utiliser des recettes qui ne sont pas coûteuses pour la fabrication de ces objets. Les dernières sont plutôt des armes d'hast et donc des armes à portée moyenne qui ne sont pas lancées. L'association entre recette et mode d'utilisation est aussi évidente dans le cas des pointes de lances de Tell ed-Dab'a (Philip, 2006 ; 209-210) où la pointe de lance à douille longue contient 12 Wt.% d'étain tandis que le reste des pointes de lances courtes contiennent moins de 9.5 Wt.% d'étain.

Une autre distinction pourrait s'effectuer entre les haches fenestrées larges et les haches fenestrées étroites. Bien que nos conclusions soient similaires à celles de Caspi *et al.*, (2009) notre argumentation est fondamentalement différente. En effet, nos résultats montrent que les deux types de haches sont fabriqués de la même manière et qu'il n'y a aucune raison pour considérer que les haches fenestrées larges n'étaient pas produites pour être utilisées au combat. La différence principale réside dans le type de recette employé. Les analyses faites sur des haches fenestrées découvertes sur l'ensemble du Levant⁷⁹ montrent qu'elles sont souvent réalisées à partir d'alliages au plomb qui sont des recettes économes (partie 4.1.4). Par contre, aucune des haches fenestrées larges analysées jusqu'à présent ne contient des teneurs en plomb supérieures à 1 Wt.%. Ainsi, il est

⁷⁹ Shalev (2009) présente une compilation des analyses faites sur les haches fenestrées au Levant Sud. Philip (1991) a analysé trois haches fenestrées de Hama en Syrie.

probable que les artisans ont voulu préserver la valeur matérielle et probablement la valeur symbolique des haches fenestrées larges. De plus la fabrication de haches fenestrées larges à partir de métaux précieux exprime une volonté d'exhiber le prestige, le rang social ou la situation de pouvoir par l'intermédiaire de ce type de hache et non pas par les haches fenestrées étroites faites exclusivement en alliages cuivreux. Nous pouvons considérer donc que les haches fenestrées larges sont le vecteur symbolique d'un « statut » plus élevé que les haches fenestrées étroites.

4.2.3- Nouveautés, diffusions et connections interrégionales

Les données disponibles sur les armes semblent indiquer qu'à la fin du 3^e millénaire / début du 2^e millénaire au Levant plusieurs techniques métallurgiques nouvelles apparaissent. A l'unité culturelle, qui se manifeste par les pratiques funéraires et par les types d'armes, s'ajoute une homogénéité au niveau des techniques de la métallurgie de transformation. Les données disponibles indiquent qu'une relation entre les alliages et les types d'armes a certainement existé. Cette relation caractérise une pratique qui obéit à des critères culturel, économique et technique communs au Levant et au Delta du Nil durant le Bronze Moyen I. Par exemple, le plomb a été ajouté pour économiser le cuivre ou l'étain et le bronze riche en étain a été utilisé pour accentuer le caractère prestigieux d'une arme.

La coulée d'ébauches de forme complexe par des moules à pièces multiples ou par la technique de la cire perdue est attestée durant le 4^e millénaire au centre et au sud de la Palestine (Shalev, 1994). Ces types de moules semblent disparaître durant le 3^e millénaire. Les objets de cette période présentent des formes simples qui n'exigent pas la création d'ébauches complexes. A la fin du 3^e millénaire au Levant nous assistons à la réintroduction des moules à pièces multiples en pierre tendre et à l'adoption des armes et des outils à collet. L'ancienneté de l'utilisation de ces objets⁸⁰ (Gernez, 2007 ; 590-610) et des moules à pièces multiples dans les régions environnantes pourraient indiquer une diffusion de cette technique de moulage dans le Levant à partir de la Mésopotamie (Moorey, 1999 ; 269) ou de l'Anatolie (Müller-Karpe ; 1994, pl. 42-43). Cependant, l'absence d'objets à collet ne signifie pas nécessairement que les artisans du Levant n'utilisaient pas des techniques de moulage complexe comme la cire perdue, la fonte en moules en terre cuite assemblés (Pernot, 1991), ou encore la fonte au sable. Dans la vallée du Nil, par exemple, la technique de cire perdue a été pratiquée depuis l'Ancien Empire (Ogden, 2009 ; 158) sans pour autant

⁸⁰ Les objets à collet replié ne sont pas pris en compte étant donné qu'ils peuvent être mis en forme par des moules simples et du travail de martelage.

que des armes à collet ne soient fabriquées (Davies, 1987 ; 54, Philip, 2006 ; 234). Ceci montre que la mise en œuvre de certains types d'objets est parfois plus liée à des choix culturels qu'aux capacités technologiques de les produire. Les armes à collet trouvées à Tell ed-Dab'a (Philip, 2006) et Kom el Hisn (Hamada, Amir, 1947) comme les haches fenestrées, les haches étroites à collet et les pointes de lances à douille montrent une diffusion de l'utilisation des moules à pièces multiples dans le Delta du Nil à partir du Levant. Cependant, l'adoption de ces moules se limite uniquement au Moyen Empire.

A l'heure actuelle le travail de déformation appliqué sur les objets en alliages cuivreux est peu connu au Levant Nord. Cette carence est due au faible nombre d'études métallographiques réalisées. Toutefois, les études menées sur le Levant Sud permettent de dresser un schéma approximatif de l'évolution de cette pratique. Le martelage et les traitements de recuit ont été pratiqués au moins depuis le chalcolithique pour la mise en forme des haches plates et des burins présentant des épaisseurs qui varient entre 7 et 30 mm (Namdar *et al.* 2004, Shalev, 1995). Les objets appartenant au Bronze Ancien montrent une plus grande maîtrise de cette pratique que se manifeste par la fabrication de plaques en cuivre de 2 mm d'épaisseur (Shalev, 1995). En l'état actuel des connaissances, il nous semble que le travail de déformation au Levant Sud, durant ces périodes, consistait à fabriquer des objets de géométrie simple. Le martelage a certainement servi à amincir les tranchants des armes et des outils et probablement à allonger les plaques sur des enclumes plates. La comparaison de ces données avec les résultats obtenus par l'étude des pointes de lances à douille montre un certain nombre de progrès acquis vers la fin du 3^e millénaire ou début du 2^e millénaire. Ils se manifestent par la capacité de produire des pièces à 0.3 mm d'épaisseur, tout en utilisant des alliages relativement nouveaux qui sont difficiles à déformer comme le bronze à plus de 12 Wt.% d'étain. De nouveaux outils comme les enclumes cylindriques sont probablement apparus durant cette période. Cette nouvelle forme d'enclume pourraient attester une influence ou une diffusion technique à partir de l'Égypte où elles étaient utilisées du moins dès la V^e Dynastie (Scheel, 1989 ; 35). Cependant, il ne faut pas négliger le rôle de la Mésopotamie à cet égard, où la production de vaisselle métallique est attestée dès le 4^e millénaire (Moorey, 1999 ; 273, Woolley, Mallowan, 1976 ; 185, pl. 100) et celle de harpons à douille est datée du 3^e quart du 3^e millénaire (Gernez, 2007 ; 387), ce qui aurait exigé l'emploi de tels outils.

Jusqu'à présent les pointes de lances du « Techno-type 1.b » sont les seuls objets au Levant ayant livré des preuves attestant l'utilisation de brasures. La seule preuve d'utilisation d'une brasure en alliage à base d'argent et de cuivre au Proche Orient durant le Bronze Ancien a été mise au jour par Ogden (1992 ; 52). Cependant, des pointes de lances comportant des plaques ajoutées sur leur douille ont été trouvées à Chagar Bazar (Mallowan, 1937 ; 135, fig. 13.11), à Ebla (Matthiae, 1980, pl. 96), à Ras Shamra (Schaeffer,

1962 ; 224, fig. 26.5), Sinjil (Dever, 1975 ; fig. 3), à Tell el-'Ajjul (Petrie, 1932 ; pl. 14.75) et à Tell ed-Dab'a (Philip, 2006 ; 62, Schiestl, 2002 ; 342). Il faut donc envisager la possibilité que l'assemblage de pièces en alliages argent-cuivre ne soit pas une pratique exclusive ni à Byblos ni aux pointe de lance. Des études métallographiques sur les pointes de lances à douille présentant des plaques ajoutées ou sur des bijoux présentant une décoration par granulation pourraient apporter des éléments de réponse sur la diffusion de cette technique d'assemblage dans la région concernée.

La détermination de la provenance du cuivre pourrait renseigner sur les circuits d'échanges directs ou indirects établis durant le début du 2^e millénaire. Les résultats des analyses des isotopes du plomb nous permettent de proposer un circuit de courte distance et un autre de longue distance. Le premier connecte Byblos et Arqa à Faynan au Levant Sud. Le second relie Byblos et Arqa à l'Iran ou à l'Oman et l'île de Masirah via Mari et/ou Ešnunna (Joannès, 1991, Michel, 1996). Cette dernière proposition est cohérente avec les indications chronologiques disponibles qui montrent une apparition simultanée des pointes de lances des techno-types 1 et 2, au Levant et en Arabie Orientale, vers la fin du 3^e millénaire (Gernez, 2007 ; 364, 365) pouvant attester d'une relation entre ces deux régions.

Les données récoltées permettent de proposer un modèle de transferts technologiques entre le Levant et les régions environnantes. D'une part, nous pouvons distinguer un échange du savoir-faire entre le Levant et l'Égypte probablement par l'intermédiaire de Tell ed-Dab'a durant le Bronze Moyen I. D'autre part, une forte influence Mésopotamienne et/ou Anatolienne est très probable. Parmi les quatre régions que nous venons de mentionner, la Mésopotamie et l'Anatolie sont les premières à avoir adopté, sans qu'elles soient nécessairement le lieu d'invention, l'utilisation du bronze et des alliages au plomb (Moorey, Schweizer, 1972, Moorey, 1999 ; 294, 295, De Ryck *et al.*, 2005) ainsi que les moules à pièces multiples. Les données disponibles sur le bronze montrent qu'il est donc possible que la diffusion d'une partie du savoir-faire métallurgique dans le Levant à partir de l'une ou des deux régions soit effectuée via la Syrie du Nord. Cette première évaluation des modalités de diffusion et de transmission des techniques métallurgiques doit être considérée comme provisoire. En effet, le matériel que nous avons étudié, bien qu'il ait été rigoureusement documenté, ne représente que partiellement le savoir-faire Levantin. L'absence de pièces sophistiquées des répertoires archéologiques ne signifie pas qu'elles n'ont jamais été fabriquées. Notre perception des objets fabriqués durant le Bronze Ancien et Moyen est biaisée par les types de contextes archéologiques qui ont favorisé leur conservation. Une grande partie des objets métalliques a été découverte dans des tombes et des dépôts qui répondent à des codes culturels exigeant la consommation d'un nombre restreint de types d'objets. Le recyclage étant intensément pratiqué depuis la découverte de la fusion du métal, la quantité et la diversité des objets dont nous disposons aujourd'hui

ne représente probablement qu'une part restreinte de ce qui a pu être produit. A titre d'exemple, la quantité d'étain mentionnée dans les correspondances des marchands assyriens du Bronze Moyen I, ayant circulée entre Assur et l'Asie Mineur, est estimée à plus d'une centaine de tonnes (Michel, 2001). De telles quantités renforcent l'idée que le nombre d'objets en bronze mis au jour actuellement ne représente qu'une infime partie de la quantité produite à l'époque. En effet, avec 100 tonnes d'étain il est possible de fabriquer au moins 650 000 objets en bronze à 15% d'étain de 1 kg chacun. Si nous ajoutons à cela le manque de données sur le Levant Nord, où les grands centres urbains (Mari, Ebla, Ras Shamra, Hama, Byblos, Alep) sont localisés, nous pouvons déduire que la recherche sur la métallurgie n'en est qu'à ses débuts et que beaucoup d'études sont nécessaires avant de pouvoir proposer une synthèse complète de l'histoire des savoir-faire Levantin.

Conclusion

Le travail réalisé dans le cadre de ce doctorat a permis, pour la première fois, d'étudier la métallurgie de transformation des alliages à base de cuivre au Bronze Moyen sur la côte Libanaise. La particularité de l'approche adoptée réside dans l'association des résultats obtenus par la métallographie, les analyses élémentaires, les analyses des isotopes du plomb et l'expérimentation. Ainsi, ce travail a permis de révéler une partie du savoir-faire de l'artisan Levantin. Notre approche, résolument tournée vers l'Archéométrie, a consisté dans un deuxième temps à confronter ces données d'ordre technologique à des informations plus classiquement archéologiques (typologies, sources textuelles, contextes). Nous avons ainsi pu mettre en évidence, à travers l'interprétation des pratiques et des choix des artisans, divers aspects du rôle des armes en tant que vecteur culturel dans la société de l'époque.

Pour chaque type d'arme, les différentes étapes de la mise en forme ont été décryptées et ont révélé un processus complexe qui témoigne de l'habileté des artisans. Il débute par la conception d'un moule qui permet de produire la forme de l'ébauche désirée tout en réduisant les risques de formation de défauts de fonderie. Le matériau utilisé dans la fabrication de ce moule doit être facile à travailler tout en étant résistant aux chocs thermiques produits par le métal en fusion. Durant la fabrication des différentes pièces d'un moule, l'artisan doit créer des empreintes qui produiront des objets dont l'épaisseur varie progressivement pour éviter des problèmes de mauvais remplissage. Ensuite, l'artisan doit concevoir la recette d'alliage et la qualité de ses ingrédients de façon à répondre aux attentes du commanditaire tout en réduisant le risque d'échec au cours de la mise en forme et de l'utilisation de l'objet. Durant la coulée, les moules doivent être bien séchés. Le métal doit être bien liquéfié avant d'être coulé. La forme de l'ébauche créée par la coulée détermine la quantité et le type du travail de déformation qui suit. Bien qu'il soit rarement rencontré ou reconnu sur les sites archéologiques, il est admis que l'artisan Levantin du Bronze Moyen disposait d'un outillage varié qui lui permettait d'effectuer les différentes opérations du martelage, d'ébarbage, de l'affûtage et du perçage. Les diverses observations et analyses effectuées dans le cadre de cette étude ont conduit à l'identification de différents types d'enclumes, de marteaux et de burins qui ont pu être utilisés. Le contrôle des températures et du temps du chauffage du métal apparaît nécessaire au bon

déroulement des traitements de recuit et à la réalisation des brasures. La couleur du métal chauffé était certainement un indicateur plus ou moins précis (environ à 50°C près) de la température atteinte, suivant le niveau de performance de l'opérateur. Enfin, La mise en forme d'une arme était complétée par des opérations de finitions comme le polissage, par l'ajout de certains éléments décoratifs, des manches, des hampes, des rivets et des clous de fixation.

La mise en évidence de l'utilisation de brasures sur des objets en alliage cuivreux constitue une première dans le sens où les seuls objets présentant des techniques d'assemblages similaires ont été trouvés dans les tombes ou les cimetières royaux Egyptiens ou Mésopotamiens. Ceux-ci ont rarement fait l'objet d'analyses élémentaires et d'observations métallographiques. Ainsi, les données obtenues à partir des armes de Byblos offrent des informations essentielles sur les modalités d'application de la brasure sur des objets en alliages cuivreux et en métal précieux durant l'Age du Bronze.

Bien qu'une grande partie des résultats obtenus concernent principalement Byblos, et dans une moindre mesure Arqa, Yanouh et Khariji, la similitude de ces données avec celles d'autres sites préalablement étudiés autorise à étendre les conclusions avancées sur l'ensemble de la région levantine. L'étude de l'important corpus de Byblos a permis d'établir une relation entre le type d'arme, le type de recette utilisée et le procédé de fabrication. Cette relation n'est pas uniquement tributaire des aspects techniques et fonctionnels de la mise en forme de l'objet. En effet, il a été démontré que les différents types de recettes pouvaient contribuer à la communication d'un message d'ordre culturel lié au prestige, au rang social et à l'adoration des divinités. Les armes en alliage cuivreux peuvent donc présenter des variations au niveau de leur fonction, de leur esthétique, de leur valeur symbolique et de leur coût. Cette variabilité, dépendante du type d'arme, montre que nous ne pouvons pas considérer ces objets comme un ensemble portant un message unique. Egalement, les études effectuées ont démontré que la fonction de l'objet en tant que symbole peut différer en fonction de son contexte archéologique : alors que dans les tombes, les armes expriment le statut social de l'individu ; dans les dépôts d'offrandes, la quantité et le coût des armes serait un moyen d'exhiber la dévotion.

La connaissance des procédés de mise en forme des armes a permis d'apporter des éléments complémentaires à la typologie par la définition de trois « Techno-types » de pointe de lance à douille. L'identification du « Techno-type 2 » confirme la pertinence du Type 10 de la typologie de Philip. Pour l'heure, le cadre géographique et chronologique de la diffusion du « Techno-type 1.b » reste relativement restreint. De nouvelles études sur les pointes de lances provenant d'autres sites pourraient apporter plusieurs éléments de précision concernant le lieu d'invention, la diffusion et la perdurance de ce « Techno-

type ». L'apparition des « Techno-type 1.a » et « 2 » simultanément au Levant et en Arabie Orientale nous a mené à considérer l'existence d'une relation entre ces deux régions, qui pourrait, d'après nos résultats d'analyse des isotopes de plomb, être liée au commerce du cuivre.

La comparaison des techniques métallurgiques mises en lumière à travers ce travail avec celles attestées dans d'autres régions montre que l'histoire et l'évolution de cet artisanat est complexe à tel point que de nombreuses questions restent en suspens. Toutefois, dans l'état actuel de nos connaissances, nous pouvons conclure que plusieurs techniques et outillages métallurgiques sont apparus durant la phase qui regroupe la fin du 3^e millénaire et le début du 2^e millénaire. Le Levant, de par sa position géographique, représentait une zone d'échanges, en particulier technologiques, avec l'Égypte, la Mésopotamie et l'Anatolie. Bien que les modalités de ces échanges soient mal connues, elles se définissent par un transfert de savoir-faire à partir de la Mésopotamie ou de l'Anatolie peu avant et/ou durant la période du Bronze moyen. En fonction du temps qui nous était imparti et du matériel dont nous avons pu disposer pour réaliser ce travail, il apparaît que le cadre géochronologique relativement restreint de cette étude a constitué un facteur limitant l'interprétation de l'origine, de la diffusion et de la particularité des pratiques métallurgiques dans la région du Levant. Cependant, ce travail a construit une base qui mérite d'être enrichie par des études métallurgiques à venir. En effet, il serait intéressant d'étudier le mobilier métallique et les vestiges associés au travail du métal sur des sites Levantin présentant des séquences chronologiques longues et bien définies. En appliquant la méthodologie adoptée dans ce travail, nous pourrions apporter un éclairage nouveau sur l'approvisionnement et le commerce du cuivre et surtout l'évolution, l'organisation et la spécialisation de cet artisanat au cœur des sociétés de l'époque. Plus largement, ces travaux contribueraient à une meilleure compréhension des processus qui accompagnent le développement de l'urbanisation dans la région du Levant.

Bibliographie

Akkermans P., Schwartz G., 2003. *The archaeology of Syria, from complex hunter-gatherers to early urban societies (ca. 16,000-300 BC)*, Cambridge University Press, United Kingdom.

Amendola, R., 2010. *Influence of alloying elements on properties of casting copper base alloys*. Thèse de doctorat non publiée, Università degli studi di Genova, Genova.

Amiran, R., 1961. Tombs of the Middle Bronze Age I at Ma`ayan Barukh. *Atiqot* 3, p. 84-92.

Andrieu, S., Bayle, B., Pernot, P., Welter, J.-M., 2000. Influence de diverses inclusions sur le comportement d'un bronze CuSn9 sous différentes sollicitations mécaniques. *La revue de Métallurgie-CIT/ Science et Génie des Matériaux*, Mai2000, p. 599-612.

Archi A. 1982. On the organisation of the Eblaite state, *Studi Eblati*, V, p.201-220.

Artin, G., 2009. Echanges « commerciaux » et « culturels » au Levant Durant le IV^e millénaire à travers le « prisme » funéraire du site de Byblos, *Interconnections in the Eastern Mediterranean. Lebanon in the Bronze and Iron Ages. Proceedings of the International Symposium Beirut 2008. Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises*, Hors Série VI: 57-68.

Attanasio, D., Bultrini, G., Ingo, G., M., 2001. The possibility of provenancing a series of bronze Punic coins found at Tharros (western Sardinia) using the literature lead isotope database. *Archaeometry*, 43, 529-547.

Bader, L., 1997. Bey003 preliminary report. Excavations of the American University of Beirut Museum 1993-1996, *Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises*, 2, 6-94.

Bader, L., 2009. The religious architecture in the Bronze Age: Middle Bronze Beirut and Late Bronze Tell Kazel, *Interconnections in the Eastern Mediterranean. Lebanon in the Bronze and Iron Ages. Proceedings of the International Symposium Beirut 2008. Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises*, Hors Série VI: 253-270.

- Bar-Matthews M., Ayalon A., Kaufman A. & Wasserburg G., 1999.** The Eastern Mediterranean paleoclimate as a reflection of regional events: Soreq Cave, Israel. *Earth and Planetary Science Letters*, 166: 85-95.
- Barnes, I., L., Gramlich, J., W., Diaz, M., G., Brill, R., H., 1978.** The possible change of lead isotope ratios in the manufacture of pigments: a fractionation experiment. In: Carter, G., F., (dif.), *Archaeological Chemistry II*, American Chemical Society Advances in Chemistry Series 117, Washington D. C., pp. 273-277.
- Baxter D., C., Rodushkin, I., Engström E., Malinovsky D., 2006.** Revised exponential model for mass bias correction using an internal standard for isotope abundance ratio measurements by MC-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 21, 427-430.
- Beaino, F., Mattar, C., Abdul-Nour, H., 2002.** Mgharet Al-Hourriyé (karm Saddé, Caza de Zgharta) – Rapport préliminaire de la fouille de 2001. *Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises*, 6, 135-178.
- Begemann, F., Hauptmann, A., Schmitt-Strecker, S., Weisgerber, G., 2010.** Lead isotope and chemical signature of copper from Oman and its occurrence in Mesopotamia and sites on the Arabian Gulf coast. *Arabian archaeology and epigraphy*, 21, 135-169.
- Ben-Arieh, S., 2004.** Middle Bronze Age II Tombs at Kibbutz Sasa, Upper Galilee (Tomb 1 and Graves 37, 39). *Atiqot* 46, 1-22.
- Bietak, M., 1985.** Eine paläontologie der Zeit des späten Mittleren Reiches und andere Forschungsergebnisse aus dem östlichen Nildelta (Tell el-Dab'a 1979-1984). *Anzeiger der Phil.-hist. Klasse der Österreichischen Akademie der Wissenschaften*, 121, p. 313-349.
- Bilgi, Ö., 2001.** Orta Karadeniz Bölgesi Protohistorik Çay Maden Sanatının Köneki Ve Gelişimi. *Bellekten*, LXV-242, 1-36.
- Bokhari, F., Y., Kramers, J., D., 1982.** Lead Isotope Data from Massive Sulfide Deposits in the Saudi Arabian Shield. *Scientific Comm*, 1766–1769.
- Branigan, K., Mckerrell, H., Tylecote, R., F., 1976.** An examination of some Palestinian Bronzes. *Journal of the Historical Metallurgy Society*, 10 (1), 15-23.
- Brunton, G., 1947.** The dating of the cemetery at Kom el-Hisn. *Annales du Services des Antiquités de l'Égypte*, 46, 143-145.

Budd, P., 1991. Eneolithic arsenical copper: Heat treatment and the metallographic interpretation of manufacturing process, in: Pernicka, E., Wagner, G. (Eds), *Archaeometry '90*, Boston, 35-44.

Budd, P., Ottaway, B. S., 1991. The properties of arsenical copper alloys: implications for the development of Eneolithic metallurgy, in: Budd, P., Chapman, B., Jackson, C., Janaway, R., Ottaway, B. S. (Eds), *Archaeological Science 1989, proceedings of a conference on the application of scientific techniques to archaeology*, Bradford, September 1989, 132-142.

Campbell, J., 2004. *Casting Practices: the 10 Rules of Castings*, Butterwoth-Heinemann, Oxford.

Caspi E. N., Etedgui H., Rivin O., Peilstöcker M., Breitman B., Hershko I., Shilstein S., Shalev S., 2009. Preliminary Neutron Diffraction Study of two fenestrated axes from the 'Enot Shuni' Bronze Age cemetery (Israel). *Journal of Archaeological Science*, 36, 2835-2840.

Catling, H. W., 1964. *Cypriot Bronzework in the Mycenaean World*, Clarendon Press, Oxford.

Cattin, F., 2008. *Modalités d'approvisionnement et modalités de consommation du cuivre dans les Alpes au 3e millénaire avant notre ère: apport des analyses métalliques à la connaissance des peuplements du Néolithique final, du Campaniforme et du Bronze ancien.* Thèse de doctorat non publiée, Université de Genève.

Cauvin, J., 1978. *Les premiers villages de Syrie-Palestine du IXème au VIIème millénaire avant J.-C.*, Maison de l'Orient, Lyon.

Chalkias, S., Vavelidis, M., Schmitt-Strecker, S., Begemann, F., 1988. Geologische Interpretation der Blei-Isotopen-Verhältnisse von Erzen der Insel Thasos, der Ägäis und Nordgriechenlands. In: Wagner, G., A., Weisgerber, G., (dir.) *Antike Edel- und Buntmetallgewinnung auf Thasos.* Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums, Bochum, Der Anschnitt Beiheft 6, Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum 42, pp. 59–74.

Chehab, M., 1939. Tombe phénicienne de Sin el-Fil. In: Coll. (dir.), *Mélanges syriens offerts à Monsieur René Dussaud.* vol. Tome 2. Paul Geuthner, Paris, pp. 803-810.

Cleuziou, S., 1981. Oman Peninsula in the Early Second Millenium B. C. In: H. Härtel (dir.), *South Asian Archaeology 1979.* Dietrich Reimer, Berlin, pp. 279-293.

Cohen, S.L., 2005. The spearheads from the 2002-2004 excavations at Gesher. *Israel Exploration Journal* 55 (2), 129-142.

Comité International des Associations techniques de Fonderie (CIATF), 1979. *Dictionnaire idéologique de fonderie*, Edition technique des Industries de la Fonderie, Paris.

Costin, C., 1991. Craft specialization: Issues in defining, documenting and explaining the organization of production, *Archaeological method and theory*, 3, 1-56.

Crawford, H., E., W., 1974. The problem of tin in Mesopotamian bronzes. *World Archaeology*, 6 (2), 242-247.

Davey, C., 1983. The metalworkers' tools from Tell edh Diba'l, *Bulletion of the Institute of Archaeology, University of London*, 20, 169-185.

Davies, W., V., 1987. *Catalogue of Egyptian Antiquities in the British Museum, VII, Tools and Weapons. I Axes*, London.

De Garis Davies, N., 1943. *The Tomb of Rekh-Mi-Re at Thebes*, New York.

Dehayes, J., 1960. *Les outils de bronze, de l'Indus au Danube (IV^e au II^e millénaire)*, Librairie Orientaliste Paul Geuthner, Paris.

De Muynck, D., Cloquet, C., Smits, E., De Wolff, A., Quitté, G., Moensand, L., Vanhaecke, F., 2007. Lead isotopic analysis of infant bone tissue dating from the Roman era via multicollector ICP–mass spectrometry. *Analytical and Botanical Chemistry*, 390 (2), 477-486.

Dercksen, J.,G., 1996. *Old Assyrian trade in Anatolia*, Publications de l'Institut historique-archéologique néerlandais de Stamboul ,75, Istanbul.

De Ryck, I., Adriaens, A., Adams, F., 2005. An overview of Mesopotamian bronze metallurgy during the 3rd millennium BC. *Journal of Cultural Heritage*, 6, 2005, 261-268.

Dever, W. G., 1971. An MB I Tomb Group from Sinjil. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*, 204, 31-36.

Dever, W., G., 1975. MB IIA Cemeteries. At 'Ain es-Samiyeh and Sinjil. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*, 217, 23-36.

Dever, W., G., 1976. The beginning of the Middle Bronze Age in Syria-Palestine. In: Cross, F., M., Lemke, W., D., Miller, P., D., (dir.), *Magnalia Dei: The mighty acts of God. Essays on the Bible and archaeology in memory of G. Ernest Wright*, Garden City, pp. 3-38.

Dever, W., G., 1980. New vistas on the EB IV (MBI) horizon in Syria-Palestine, *Bulletin of the American School of Oriental Research*, 237, 35-64.

Diakonoff, I., M., 1974. *Structure of society and state in Early Dynastic Sumer*, Malibu, Monographs of the Ancient Near East I (3).

Doumet-Serhal, C., 2004 a. A Warrior Burial 27 at Sidon. *Archaeology and History of Lebanon* 20, 21-29.

Doumet-Serhal, C. 2004 b. Weapons from the Middle Bronze Age Burials at Sidon. In: C. Doumet-Serhal (dir.), *A Decade of Archaeology and History in the Lebanon*. The Lebanese British Friends of the National Museum, Beyrouth, 154-179.

Dorlot, J.-M., Baïlon, J.-P., Masounave, J., 1986. *Des Matériaux*, 2^e édition, Poitiers.

Du Mesnil Du Buisson, R., 1948. *Baghouz, l'ancienne Corsôte - Le Tell archaïque et la nécropole de l'Age du Bronze*, E. J. Brill, Leiden.

Dunand, M., 1937. *Fouilles de Byblos. Tome I: 1926-1932. Atlas*, Librairie d'Amérique et d'Orient Adrien Maisonneuve, Paris.

Dunand, M., 1939. *Fouilles de Byblos. Tome I: 1926-1932. Texte*, Librairie d'Amérique et d'Orient Adrien Maisonneuve, Paris

Dunand, M. 1950. *Fouilles de Byblos. Tome II: 1933-1938. Atlas*, Librairie d'Amérique et d'Orient, Adrien Maisonneuve, Paris.

Dunand, M., 1954. *Fouilles de Byblos. Tome II: 1933-1938. Texte**, Librairie d'Amérique et d'Orient, Adrien Maisonneuve, Paris

Dunand, M., 1958. *Fouilles de Byblos. Tome II: 1933-1938. Texte***, Librairie d'Amérique et d'Orient Adrien Maisonneuve, Paris.

Dunand M. 1973. *Byblos*, Beirut.

Durand, J., M., 1997. *Documents épistolaires du palais de Mari, Tome I*, Paris, Les Editions du Cerf.

Eaton, E., R., Mckerrell, H., 1976. Near Eastern alloying and some textual evidence for early use of arsenical copper. *World Archaeology*, 8 (2), 169-191.

Epstein, C., 1974. Middle Bronze Age Tombs at Kefar Szold and Ginosar. *Atiqot* 7, 13-19 (Résumé en Anglais, 2*-5*).

Erkanal, H., 1977. *Die Äxte und Beile des 2. Jahrtausends in Zentralanatolien*. Prähistorische Bronzefunde IX-8, C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung München, Munich.

Eisenberg, E., 1985. A Burial Cave of the Early Bronze Age IV (MB I) Near 'Enan. *Atiqot* 17, 59-73.

Esin, U., 1969. *Kuantitatif spektral analiz Yardimiyla Anadolu'ya Baslangicindan Asur kolonileri çagina kadar bakir ve tunç madenciligi*, Istanbul, University of Istanbul.

Eyre, C., J., 1998. The market women of Pharaonic Egypt, in Grimal, N., Menu, B., (Eds), *Le commerce en Egypte Ancienne*, Caire, Institut Francais d'Archéologie Oriental, pp. 173-192.

Faure, G., 1986. *Principle of isotope geology*, Wiley International edition, New York, 2^e edition.

Faure, G., 2001. *Origin of igneous rocks : the isotopic evidence*, Springer, Berlin.

Festuccia, S., 2000. The Moulds of Ebla: Morphology and Archaeological Contexts. In: P. Matthiae, A. Scienze Eneolitiche, L. Peyronel et F. Pinnock (dir.), *Proceedings of the First International Congress of the Archaeology of the Near East*. Università degli studi di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di storiche, archeologiche e antropologiche dell'antichità, Rome, 2000, 411-420.

Fluzin, P., 1983. Notions élémentaire de sidérurgie, in: Echard, N. (dir.), *Métallurgies Africaines, mémoire de la société des africanistes*, 9, pp.13-44.

Frost, H., Morhange, C., 2000. Proposition de localisation des ports antiques de Byblos, *Méditerranée*, 94, 101-104.

Fugmann, E., 1958. *Hama, fouilles et recherches 1931-1938 - L'architecture des périodes préhellénistiques*, 2, Fondation Carlsberg, Copenhagen.

Gale, N., H., 1989. Archaeometallurgical studies of Late Bronze Age ox-hide copper ingots from the Mediterranean region. In: Hauptmann, A., Pernicka, E., Wagner, G., A., (dir.) *Archäometallurgie der Alten Welt*. Beiträge zum Internationalen Symposium Old World Archaeometallurgy, Heidelberg 1987. Bochum, pp 247–268

Gale, N., H., Bachmann, H., G., Rothenberg, B., Stos-Gale, Z., A., Tylecote, R., F., 1990. The adventitious production of iron in the smelting of copper. In: Rothenberg, B., Bachmann, H., G., (dir.) *Researches in the Arabah 1959–1985*. IAMS, University College, London, pp 182–191

Gale, N., H., Stos-Gale, Z., A., Gilmore, G., R., 1985. Alloy types and copper sources of Anatolian copper alloy artefacts. *Anatolian Studies*, 35, 143–173

Gale, N., H., Stos-Gale, Z., A., Lilov, P., Dimirov, M., Todorov, T., 1991. Recent studies of eneolithic copper ores and artefacts in Bulgaria. In: Mohen, J., P., Eluère, C., (dir.), *Découverte du métal*. Colloque de l'exposition Le premier or de l'humanité en Bulgarie (Saint-Germain-en-Laye; 1989), Coll. Millénaires 2. Picard, Paris, pp 49–75.

Gale, N., H., Stos-Gale, Z., A., Maliotis, G., Annetts, N., 1997. Lead isotope data from the Isotrace Laboratory, Oxford: archaeometry data base 4, ores from Cyprus. *Archaeometry*, 39(1), 237–246

Gale, N., H., Stos-Gale, Z., A., Radouncheva, A., Ivanov, .I, Lilov, P., Todorov, T., Panayotov, I., 2000. *Early metallurgy in Bulgaria*. In: *Annuary of department archaeology*, 4–5. New Bulgarian University, Institute of Archaeology with Museum, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, pp. 102–168.

Gardiner, A., H., Peet, T., E., Czerny, J., 1955. *The inscriptions of Sinai*, Part 2, Egypt Exploration society Memoir 45, Londres.

Gautier, J.E., 1895. Notes sur les fouilles entreprises dans la haute vallée de l'Oronte. *Comptes-rendus des séances de l'Académie de Belles-Lettres*, 39^e année, 5, 441-464.

Genz, H., 2009. Tell Fadaous-Kfarabida : Regional connections in the Early Bronze Age, *Interconnections in the Eastern Mediterranean. Lebanon in the Bronze and Iron Ages. Proceedings of the International Symposium Beirut 2008. Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises*, Hors Série VI, 107-116.

Gernez, G., 2007. *L'armement en métal au Proche et Moyen-Orient, Des origines à 1750 av. J.-C.*, Thèse non publiée, Université Paris I.

Gernez, G., 2008. A propos du moule à bijoux du Tell Arqa. *Archaeology and History of Lebanon*, 26-27, autumn 2007 / spring 2008, 59-69.

Gernez, G., 2010. Le métal de Tell Arqa à l'Age du Bronze. *Bulletin d'archéologie et d'architecture Libanaise*, 12, 2008, 221-264.

Gerstenblith, P., 1980. A reassessment of the Beginning of the Middle Bronze Age in Syria-Palestine. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*, 237, 65-84.

Giumlia-Mair, A., 2005. On surface analysis and archaeometallurgy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 239, p. 35-43.

Golden, J., Levay, T., Hauptmann, A., 2001. Recent discoveries concerning Chalcolithic metallurgy at Shiqmim, Israel. *Journal of Archaeological Science* 28, p. 951-963.

Guénette-Beck, B., 2005. Minerais, métaux, isotopes: recherches archéométriques sur les mines de plomb et d'argent en Valais, Suisse. Thèse de doctorat non publiée, Université de Lausanne.

Guigues, P. E., 1937. Lébé'a, Kafer-Ğarra, Qrayé, nécropoles de la région sidonienne. *Bulletin du Musée de Beyrouth*, 35-76.

Guigues, P. E., 1938. Lébé'a, Kafer-Ğarra, Qrayé, nécropoles de la région sidonienne (suite). *Bulletin du Musée de Beyrouth* 2, 27-72.

Guy, P., L., O., 1938. *Megiddo tombs*, Chicago.

Hamada, A., Amir, 1947. Excavations at Kôm el-Hisn. Season 1943. *Annales du Service des Antiquités de l'Égypte*, 46, 101-11.

Hanson, D., Marryat C., B., 1927. Investigation of the effects of impurity on copper. Part III- The effect of arsenic on copper. Part IV- the effect of arsenic plus oxygen on copper. *Journal of the Institute of Metal*, 37, 121-168.

Hauptmann, A., 2007. *The archaeometallurgy of copper, Evidence form Faynan, Jordan*, Springer-Verlag, Berlin.

Hauptmann, A., Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., 1999. Copper objects from Arad: Their composition and provenance. *Bulletin of American Schools of Oriental Research* 315, 1-17.

Hauptmann, A., Rehren, T., Schmitt-Strecker, S., 2003. Early Bronze Age Copper Metallurgy at Shahr-i Sokhta (Iran), reconsidered. In: Stöllner, T., Körlin, G., Steffens, G., Cierny, J., (dir.) *Man and Mining – Mensch und Bergbau. Studies in honour of Gerd Weisgerber on occasion of his 65th birthday*. Der Anschnitt, Beiheft 16, Deutsches Bergbau Museum Bochum, pp 197–213.

Hirao, Y., Enomoto, J., Tachikawa, H., 1995. Lead isotope ratios of copper, zinc and lead minerals in Turkey in relation to the provenance study of artefacts. In: Prince Takahito Mikasa HIH (dir.) *Essays on Ancient Anatolia and its surrounding civilisations*. Harrassovitz Verlag, Wiesbaden, pp 89–114.

Høljund, F., 2003. Copper and Copper Working. In: H. H. Andersen, F. Høljund (dir.), *The Barbar*

Temples: Volume 1. Jutland Archaeological Society, Moesgaard, p. 255-282.

Huot J.-L. 2004. *Une archéologie des peuples du Proche-Orient*, Tome II, Edition Errance, Paris.

Huot J.-L., Thalmann, J.-P., Valbelle, D., 1990. *Naissance des cités*, Edition Nathan, Paris.

Cui, J., Wu, X., 2011. An experimental investigation on lead isotopic fractionation during metallurgical processes. *Archaeometry*, 53(1), 205-214.

Jidejian, N., 1968. *Byblos through the ages*, Dar el-Mashrek, Beyrouth.

Joannès, F. 1991. L'étain, de l'Elam à Mari. In : De Meyer L., Gasche H. (dir.), *Mésopotamie et Elam. Actes de la XXXVIème Rencontre Assyriologique Internationale, Gand, 10-14 juillet 1989*, pp. 67-76.

Joannès, F., 1997. Metalle und Metallurgie, in Ebeling, E., Meissner, B., *Reallexikon der Assyriologie und Vorderasiatischen archäologie*, 8, pp. 96-112.

Junk, M., 2003. *Material properties of copper alloys containing arsenic, antimony and bismuth, the material of Early Bronze Age ingot torques*, Thèse de doctorat non publiée, Universität Bergakademie Freiberg, Dresde.

Kamlah, J., Sader, H., 2010. The Tell el-Burak archaeological project preliminary report on the 2005, 2008 and 2009 seasons, *Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises 2008*, 12, 17-35.

Keesman, I., Moreno Onorato, A., 1999. Naturwissenschaftliche Untersuchungen zur frühen technologie von kupfer und kupfer-arsen-bronze. In Hauptmann, A., Pernicka, E., Rehren, T., and Yalçin Ü., (ed.), *the Beginnings of Metallurgy, Der Anschnitt: Beiheft 9*, pp. 317-332.

Kenyon, K., M., 1960. *Excavations at Jericgo, I*, British School of Archaeologyin Jerusalem, London.

Kenyon, K.,M., 1965. *Excavations at Jericgo, II*, British School of Archaeologyin Jerusalem, London.

Kenyon, K., M., 1966. *Amorites and Canaanites*, The Schweich Lectures of the British Academy, London, Oxford University Press.

Khalil, L., 1980. *The composition and technology of ancient copper alloy artifacts from Jericho and related sites*, thèse de doctorat, Institute of Archaeology, university college London, London.

Khalil, L., 1984. Metallurgical analyses of some weapons from Tell El-'Ajjul. *Levant* 16, 167-170.

Kramers, J., D., Tolstikhin, I., N., 1997. Two terrestrial lead isotope paradoxes, forward transport modelling, core formation and the history of the continental crust. *Chemical Geology*, 139, 75-110.

Kunkel, J., 1994. Appendix: Die Metallfunde aus Asimah, ras al-Khaimah. In: B. Vogt (dir.), *Asimah. An Account of Two Months Rescue Excavation in the Mountains of Ras al-Khaimah*, United Arab Emirates. Shell Markets Middle East, Dubai, p. 187-204.

Lafont, B., 2009. D'Ur à Byblos: les relations entre la Mésopotamie et le Levant aux Ages du Bronze Ancien et Moyen. L'apport des textes, *Interconnections in the Eastern Mediterranean. Lebanon in the Bronze and Iron Ages. Proceedings of the International Symposium Beirut 2008. Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises*, Hors Série VI: 91-106.

Lauffray, J., 2008. *Fouilles de Byblos VI*, Institut français du Proche-Orient, Beyrouth.

Lechtman, H., 1996. Arsenic Bronze: Dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas, *Journal of Field Archaeology*, 23, 477-514.

Leclant, J., 2005. *Dictionnaire de l'Antiquité*, Quadrige Puf.

Le Roux, G., Véron, A., Scholz, C., 2009. Metal and Pb Isotope Analyses on Weapons from the Bronze Ages in Sidon. *Archaeology and History in Lebanon* 29, 68-75.

Levy, T., Shalev, S., 1989. Prehistoric metalworking in southern Levant: Archaeometallurgical and social perspectives. *World Archaeology* 20 (3), 352-372.

Limet, H., 1972. Les métaux à l'époque d'Agadé (2370-2250 av. J.-C.). *Journal of the economic and social history of the Orient*, 15 (1), Juin 1972, 3-34.

Lucas, A., 1948. *Ancient Egyptian materials and industries*, 3^e édition, Edward Arnold & Co., London.

Makaroun, Y., 2009. L'urbanisation de Byblos dans son context regional, *Interconnections in the Eastern Mediterranean. Lebanon in the Bronze and Iron Ages. Proceedings of the International Symposium Beirut 2008. Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises*, Hors Série VI: 77-90.

Mallowan, M., E., L., 1937. The Excavations at Tall Chagar Bazar, and an Archaeological Survey of the Habur Region. Second Campaign, 1936. *Iraq* 4, 91-177.

Mallowan, M., E., L., 1947. Excavations at Brak abd Chagar Bazar, *Iraq*, 9, 1-259.

Matthiae, P., 1980. Fouilles à Tell Mardikh-Ebla, 1978: le bâtiment Q et la nécropole princière du bronze moyen II. *Akkadica* 17, 1-52.

Maréchal, J., R., 1958. Etude sur les propriétés mécaniques des cuivres à l'arsenic. *Métaux : Corrosion-Industries*, 33 (397), 377-383.

Margueron, J.-C., 2004. *Mari, métropole de l'Euphrate, au III^e et au début du II^e millénaire av. J.-C.*, Picard, Paris.

Margueron J.-C., Pfirsh, L., 2005. *Le Proche-Orient et l'Egypte antiques*, Hachette supérieur, Paris.

Maryon, H., 1912. *Metalwork and enamelling*, London.

Maryon, H., 1936. Soldering and welding in the Bronze and Early Iron Ages. *Technical Studies*, 5, 75-108.

Maryon, H., 1941. Archaeology and archaeometallurgy. I. Welding and soldering, *Man*, 41, 118-124.

Maryon, H., 1949. Metal working in the ancient world, *American Journal of Archaeology*, 53 (2), 93-125

Matthiae, P., 1980. Fouilles à Tell Mardikh-Ebla, 1978: le bâtiment Q et la nécropole princière du bronze moyen II. *Akkadica* 17, 1-52.

Maxwell-Hyslop, R., 1946. Daggers and Swords in Western Asia. A Study from Prehistoric Times to 600 B.C. *Iraq* 8, 1-65.

Maxwell-Hyslop, R., 1949. Western Asiatic shaft-hole axes. *Iraq*, 11, 90-130.

Mazzoni, S., 2009. Seals and Jars- the evidence of early interconnections in the eastern Mediterranean, in: *Interconnections in the Eastern Mediterranean. Lebanon in the Bronze and Iron Ages. Proceedings of the International Symposium Beirut 2008. Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises, Hors Série VI*: 37-56.

Menu, B., 2004. *Egypte pharaonique, Nouvelles recherches sur l'histoire juridique, économique et sociale de l'ancienne Egypte*, Paris, L'Harmattan.

Michel, C., 1996. Le commerce dans les textes de Mari. In Durand J.-M. (dir.), *Mari, Ebla et les Hourrites, dix ans de travaux, Amurru 1*, pp. 385-426.

Michel, C., 2001. *Correspondance des marchands de Kanish, Paris*, Les Editions du Cerf.

Michel, C., 2008. Etain et cuivre dans les archives commerciales du XIX^e s. av. J.-C. : du commerce du métal à l'objet, *Cahier des thèmes transversaux ArScAn*, vol. VIII, 2006 – 2007, Thème III : Systèmes de production et de circulation, pp. 59-65.

Milano, L., 1995. Ebla: A third-millennium city-state in Ancient Syria, in Sasson, J., M., (dir.), *Civilization of the Ancient Near East*, Vol. II, Simon & Schuster, pp. 1219-1230.

Miller, N., 1997. Farming and herding along the Euphrates : Enviromental constraint and cultural choice (Fourth to second millennia B.C.), in R. Zettler (eds), *Subsistence and settlement in a marginal environment: Tell es-Sweyhat, 1989-1995 Preliminary report*, Philadelphia: MASCA Research Papers in Science and Archaeology 14, pp.123-32

Mirnejad, H., Simonetti, A., Molasalehi, F., 2011. Pb isotopic compositions of some Zn-Pb deposits and occurrences from Urumieh-Dokhtar and Sanandaj-Sirjan zones in Iran. *Ore Geology Reviews*, 39, 181-187.

Miron, E., 1992. Axes and adzes from Canaan. *Prähistorische Bronzefunde IX-9*, Franz Steiner Verlag, Stuttgart.

Monchambert J.-Y., Bargman, J., Beaudoux, J., Cuny, A., Morvillez, E., 2010. Une campagne de sondages sur le tell Kharayeb à Yanouh (Liban) (Printemps 2006). *Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaise*, 12, 35-149.

Monroe, C., M., 2005. Monet and trade, in Snell, D., (dir.), *A companion to the Ancient Near East*, pp. 171-184.

Montet, P., 1925. Les fouilles de Byblos en 1924. *Comptes-rendus des scéances de l'académie des Inscriptions et Belles-lettres*, 69(1), 25-33.

Montet, P., 1928. *Byblos et l'Égypte, Quatre campagnes des fouilles à Gebeil 1921-1922-1923-1924*, texte, Librairie Orientaliste Paul Geuthner, Paris.

Moorey, P.R.S., Schweizer, F., 1972. Copper and copper alloys in ancient Iraq, Syria and Palestine: Some new analyses. *Archaeometry* 14, 177-198.

Moorey, P., R., S., 1999. *Ancient Mesopotamian materials and industries, the archaeological evidence*, Eisenbrauns, Indiana.

Moussa, A., M., Altenmüller, H., 1977. *Das Grab des Nianchchnum and Chnumhotep*. Mainz.

Muhly, J., D., 1985. Sources of tin and the beginnings of bronze metallurgy. *American Journal of Archaeology*, 89 (2), 275-291.

Müller-Karpe, M., 1990. Der Gruss in der Verlorenen Sandform in Mesopotamien , *Mitteilungen der Deutschen Orient-Gesellschaft*, 122, 173-192.

Müller-Karpe, M., 2004. Katalog I: Untersuchung Metallobjekte aus Mesopotamien. In: H. Hauptmann, E. Pernicka (dir.), *Die Metallindustrie Mesopotamiens von den Anfängen bis zum 2. Jahrtausendv. Chr.* Verlag Marie Leidorf, Rahden, pp. 1-90.

Namdar, D., Segal, I., Yuval, G., Shalev, S., 2004. Chalcolithic copper artefacts, in: Scheftelowitz, N., Oren, R. (Eds), Giv'at Ha-Oranim, a Chalcolithic site. *Salvage Excavation Reports*, 1, 70-83.

Negbi, O., Moskowitz, S., 1966. The "Foundation Deposits" or "Offering Deposits" of Byblos. *Bulletin of the American School of Oriental Research*, 184, 21-26.

Nezafati, N., Pernicka, E., Momenzadeh, M., 2009. Introduction of the Deh Hosein ancient Tin-Copper mine, westren Iran: Evidence from geology, archaeology, geochemistry and Lead isotope data. *Annual Journal of archaeology*, 12, 223-236.

Nicolle, C., 2007. La transformation des sociétés Chalcolithiques au Levant sud, influences et originalités, in : Guillaîne J. (dir.), *Le chalcolithique et la construction des inégalités*, Tome II, Edition Errance, Paris, 43-66.

Nigro, L., 2009. The eighteen century BC princes of Byblos and Eblaand the chronology of the Middle Bronze Age, *Interconnections in the Eastern Mediterranean. Lebanon in the Bronze and Iron Ages. Proceedings of the International Symposium Beirut 2008. Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaises*, Hors Série VI, 159-175.

Northover, P., 1989. Properties and use of arsenic-copper alloys, in: Hauptmann, A., Pernicka, E., Wagner, G. (dir.), *Old World Archaeometallurgy, Proceedings of the International symposium "Old World Archaeometallurgy", Heidelberg 1987*, pp. 111-118.

Northover, P., Rychner, V., 1998. Bronze analysis: experience of a comparative programme, in : Mordant, C., Pernot, M., Rychner, V. (dir.), *L'atelier de bronzier en Europe du XXe au VIIIe siècle avant notre ère. Vol. I : Les analyses de composition du métal : leur apport à l'archéologie de l'Age du Bronze*, Paris, pp. 19-40.

Northover, P., 2000. Analysis of Bronze Age metalwork from Tell Beydar. In: Van Lerberghe, K., et Voet, G., (dir.), *Tell Beydar: Environmental and Technical Studies*. Subartu VI. Brepols, Turnhout, pp. 117-123

Northover, P., 2001. Analysis of the Metalwork from Tell Brak. In: Oates, D., Oates, J., McDonald, H., (dir.), *Excavations at Tell Brak. Vol. 2: Nagar in the third millenium BC*, Londres, pp. 254-256.

Ogden, J., 1992. *Interpreting the past: Ancient jewellery*, London, BMP.

Ogden, J., 2009. Metals, in Nicholson, P., T., Shaw, I., (dir.), *Ancient Egyptian materials and technology*, 5^e édition, Cambridge University Press, Cambridge

Özgüç, T., 1950. Ausgrabungen in Kültepe. Bericht über Aufträge der Türkischen Historischen Gesellschaft, 1948 Durchgeführten Ausgrabungen. Türk Tarih Kurumu Yayınlarından V-10, Türk Tarih Kurumu Basımevi, Ankara.

Özgüç, T., 1959. *Kültepe-Kaniş. New Researches at the Center of the Assyrian Trade Colonies*. Türk Tarih Kurumu Yayınlarından V-19, Türk Tarih Kurumu Basımevi, Ankara.

Özgüç, T., 1986. *Kültepe-Kaniş II. New Researches at the trading center of the Ancient Near East*. Türk Tarih Kurumu Yayınlarından V-41, Türk Tarih Kurumu Basımevi, Ankara.

Özgüç, T., 2003. *Kültepe. Kaniş/Neša: The earliest international trade center and the oldest capital of the Hittites*, The Middle Eastern Culture center in Japan, Istanbul.

Palmieri, A., Begemann F., Schmitt-Becker, S., Hauptmann, A., 2002. Chemical composition and lead isotopy of metal objects from the "Royal" tomb and other related finds at Arslantepe, Eastern Anatolia. *Paleorient*, 28(2), 43-69.

Palmieri, A., Hauptmann, A., 2000. Metals from Ebla: Chemical Analysis of Metal Artefacts from the Bronze and iron Ages. In: Matthiae, P., Enea, A., Peyronel, L., Pinnock, F., (dir.),

Proceedings of the First International Congress of the Archaeology of the Near East. Università degli studi di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di scienze storiche, archeologiche e antropologiche dell'antichità, Rome, pp. 1259-1281.

Pazuchin, V., A., 1964. On the origin of ancient copper containing arsenic. *Izvestia Akademii Nauk SSSR-Metallurgia I Gornoe Delo*, 1, 151-165.

Peltenburg, E., Campbell, S., Croft, P., Lunt, D., 1995. Jerablus-Tahtani, Syria, 1992-4: Preliminary Report. *Levant*, 27, 1-75.

Pernicka, E., Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., 1993. Eneolithic and early Bronze age copper artefacts from the Balkans and their relation to Serbian copper ores. *Praehistorische Zeitschrift*, 68, 1–55.

Pernot, M., 1991. Vaisselle et technologie des alliages base cuivre, in : Feugère, M., et Rolley, C., (dir.), *La vaisselle tardo-républicaine en bronze*, CRTGR n° 13, Université de Bourgogne, Dijon, pp. 131-137.

Pernot, M., 1999. La métallographie, in : *A la recherche du métal perdu*, Editions Errance, Paris, pp. 65 – 69.

Pernot, M., 2000. Forming bronze by plastic deformation around the 1st millennium BC in Western Europe, in : Yue, S., and Essadiqi, E. (Eds), *Thermomechanical Processing of Steel – J.J. Jonas Symposium*, Metallurgical Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, pp. 615-626.

Pernot, M., 2004. Des bronziers au travail dans leur atelier..., in : Lehoërf, A. (éd.), *L'artisanat métallurgique dans les sociétés anciennes en méditerranée orientale. Techniques, lieux et formes de production*, Ecole Française de Rome 332, pp. 171-191.

Pernot, M., Dubos, J., Lacoste, D., Le Fevre-Lehöerff, A., 1993. Expérimentation sur la fonderie artisanale des alliages base cuivre, *Revue Archéologique de l'Est*, 44, 338-341.

Pernot, M., Montheillet, F., 1994. Archéométaballurgie du fromage : le martelage des alliages à base de cuivre à l'époque protohistorique, Premiers résultats. *La Revue de Métallurgie - CIT / Science et Génie des Matériaux*, Mai 1994, 849-861

Pernot, M., Thomas, N., Ervas, A., Robcis, D. Les techniques de mise en forme par déformation plastique (a paraitre dans la monographie sur l'Hôtel de Mongelas, Paris).

Philip, G., 1988. Hoards of the Early and Middle Bronze Ages in the Levant. *World Archaeology*, 20(2), 190-208.

Philip, G., 1989. *Metal weapons of the Early and Middle Bronze Ages in Syria-Palestine* 526, BAR International Series, Oxford.

Philip, G., 1991. Tin, Arsenic, Lead: Alloying practices in Syria-Palestine around 2000 BC. *Levant* 13, 93-104.

Philip, G., 1995. Warrior Burials in the Ancient Near-Eastern Bronze Age: the Evidence from Mesopotamia, Western Iran and Syria-Palestine. In: Campbell, S., Green, A., (dir.), *The Archaeology of Death in the Ancient Near East*. Oxbow Books, Oxford, pp. 140-154.

Philip, G. 2006. *Tell el-Dab'a XV. Metalwork and metalworking evidence of the late Middle Kingdom and the Second Intermediate Period*, Vienna, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Philip, G., Clogg, W., Dungworth, D., Stos, S., 2003. Copper metallurgy in the Jordan Valley from the Third to the First Millennia BC: Chemical, Metallographic and Lead Isotope Analyses of artefacts from Pella. *Levant*, 35, p. 71-100.

Piccardo, P., Amendola, R., Natali, S., Ammannati, N., Martellucci, E., 2004. *Some aspect of tin amount influence in α -bronzes*. Internal laboratory report of the Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale, non publié.

Piccardo, P., Amendola, R., Adobati, A., Faletti, C., 2009. Studio della fluidità di leghe a base rame. *La Metallurgia Italiana*, maggio, 2009, 31-38.

Pollard, M., A., Heron, C., 2008. *Archaeological Chemistry*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge.

Porada, E., 1966. Les cylindres de la Jarre de Montet. *Syria*, 43 (3-4), 243-258.

Porter, A., 2007. You say potato, I say... Typology, chronology and the origins of the Amorrites, in Kuzucuoglu C. et Marro C.(eds), *Sociétés Humaines et changement climatique à la fin du troisième millénaire: Une crise a-t-elle eu lieu en Haute Mésopotamie ?*, Actes de colloque de Lyon 2005, Paris, pp.68-117.

Postgate, N., 1992. *Early Mesopotamia: Society and Economy at the dawn of history*, London, Routledge.

Potts, D.T., 1998. Some issues in the study of the pre-Islamic weaponry of southeastern Arabia. *Arabian Archaeology and Epigraphy*, 9(2), 182-208.

Powell, M., A., 1996. Money in Mesopotamia. *Journal of economic and social history of the Orient*, vol. 39 (3), 224-242.

Prag, K. 1986. Byblos and Egypt in the Fourth Millenium , *Levant*, 17, 59-74

Prange, M., 1998. *Vergleichende Untersuchungen zur Charakterisierung des omanischen Kupfers mittels chemischer und isotopischer Analysenmethoden.* These de doctorat non publiée, Fakultät für Chemie, Ruhr-Universität Bochum.

Prévalet, R., 2010. La granulation en Méditerranée Orientale à l'Age du Bronze. *les annales archéologiques arabes syriennes*, XLIX-L, 31-44.

Quillec, B., 2003. L'épée atlantique : échanges et prestige au Bronze final, thèse de doctorat, Université Panthéon-Sorbonne (Paris), Paris.

Raviš, I., G., Ryndnia, N., V., 1995. Early Copper-Arsenic alloys and the problem of their use in the Bronze age of North Caucasus. *Bulletin of the Metals Museum*, 23, 1-18.

Renan, E., 1864. *Mission de Phénicie*, Imprimerie Imperiale, Paris.

Richard, S., 1987. The Early Bronze Age: The rise and collapse of urbanism. *Biblical Archaeologist*, 50 (1), 22-43.

Richard, S., 2006. Early Bronze Age IV transitions: An archaeometallurgical study, in Gitin, S., Wright, J., E., Dessel, J., P., (dir), *Confronting the past, Archaeological and historical essays on the Ancient Israel in honor of William G. Dever*, pp. 119-132.

Robbiola, L., 1990. *Caractérisation de l'altération des bronzes archéologiques enfouis à partir d'un corpus d'objets du l'Age du bronze – Mécanisme de corrosion.* Thèse de doctorat non publiée, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Paris.

Roberts, P., M., 1974. Early evolution of Brazing, *Welding and Metal Fabrication*, 42, 412 ff.

Rosen, A., M., 1989. Enviromental change at the end of the Early Bronze Age Palestine, in De Miroschedji, P., (Eds), *L'urbanisation de la Palestine à l'âge du Bronze Ancien*, Oxford: BAR international, 527, pp. 246-56.

Rosenfeld, A., Ilani, S., Dvorachek, M., 1997. Bronze Alloys from Canaan during the Middle Bronze Age. *Journal of Archaeological Science* 24, issue 9, p. 857-864.

- Ruhrmann, J., 1925.** Über Arsen und Nickel sowie deren Sauerstoffverbindungen im Kupfer und ihren Einfluß in geringen Mengen auf seine mechanischen Eigenschaften. *Metall und Erz*, XXII (14), 339-348.
- Saghieh, M., 1983.** *Byblos in the third millennium B.C.*, Aris & Phillips, Warmister.
- Saidah R., 1994.** Beirut in the Bronze Age: The Kharji Tombs, *Berytus: Archaeological Studies*, 1993-1994, 41, 137–222.
- Sanlaville, P., 2000.** *Le Moyen Orient arabe : le milieu et l'homme*, Arman Colin, Paris.
- Saunders, N., Miodownik, A.P., 1990.** The Cu-Sn (copper-tin) system. *Journal of Phase Equilibria*, 11, issue 3, 278-287.
- Sayre, E., V., Joel, E., C., Blackman, M., J., Yener, K., A., Özbal, H., 2001.** Stable lead isotope studies of Black Sea Anatolian ore sources and related Bronze Age and Phrygian artefacts from nearby archaeological sites. Appendix: new Central Taurus ore data. *Archaeometry*, 43(1), 77–115.
- Schaeffer, C.F.A., 1949.** *Ugaritica II*, Librairie Orientaliste Paul Geuthner, Paris.
- Schaeffer, C., F., A., 1962.** *Ugaritica IV*, Librairie Orientaliste Paul Geuthner, Paris.
- Schaeffer-Forrer, C. F. A., 1978.** *Ugaritica VII*. Librairie orientaliste Paul Geuthner, Paris.
- Scheel, B., 1989.** *Egyptian metalworking and tools*, Aylesbury, Shire Publications.
- Schiestl, R., 2002.** Some links between a Late Middle Kingdom cemetery at Tell el-Dab`a and Syria-Palestine: The Necropolis of F/1, Strata d/2 and d/1 (=H and G/4). In: Bietak, M., (dir.), *The Middle Bronze Age in the Levant*. Verlag der Österreichischen Akademie Der Wissenschaften, Vienne, pp. 329-352.
- Schwartz, G., 2005.** Taking the long view on collapse: a Syrian perspective , in Kuzucuoglu C. et Marro C. (dir.), *Sociétés Humaines et changement climatique à la fin du troisième millénaire: Une crise a-t-elle eu lieu en Haute Mésopotamie ?*, Actes de colloque de Lyon 2005, pp. 45-67.
- Schwartz, G. M., Curvers, H. H., Dunham, S. S., Stuart, B., 2003.** A Third-Millennium B.C. Elite Tomb and Other New Evidence from Tell Umm el-Marra. *American Journal of Archaeology*, 107(3), 325-361.

Segal, I., Halicz, L., Cohen, R., 1999. A study of ingots and metallurgical remains from 'Ein Ziq and Beer Resisim, Central Negev, Israel. In: Young, S., M., M., Pollard A., M., Budd., P., Ixer, R., A., (dir) *Metals in Antiquity*. BAR Intern Series S 792, Oxford, pp. 179–186.

Segal, I., Ilani, S., Rosenfeld, A., 2000. Wadi Tar Copper-Arsenic Ore – Lead Isotope Study: Was it Used in Canaan during the Chalcolithic, EB and MBI Periods? *Geological Survey Israel*, 12, 244–246.

Segal, I., Halicz, L., Kamenski, A., 2004. The Metallurgical Remains from Asqelon, Afridar – Areas E, G and H. *Atiqot*, 45, 311–330

Seif, A., 2010. *Les dynamiques spatiales et la céramique du couloir syro-palestinien du Néolithique à l'âge du Bronze : le cas du 'Akkar*, thèse de doctorat non-publiée, Paris I, Panthéon, Sorbonne.

Shalev, S., 1989. Redating the “Philistine sword” at the British Museum: A case study in typology and technology. *Oxford Journal of Archaeology*, 7 (3), 303-311.

Shalev, S., 1994. The change in metal production from the Chalcolithic period to the Early Bronze Age in Israel and Jordan. *Antiquity*, 68, 630-637.

Shalev, S., 1995. Metals in ancient Israel: Archaeological interpretation of chemical analysis. *Israel Journal of Chemistry*, 35, 109-116.

Shalev, S., 2000. Archaeometallurgy, in: Kochavi, M., Beck, P., Yadin, E. (Eds), *Aphek-Antipatris I*, Tel Aviv University, 278-287.

Shalev, S., 2002. Metal artifacts, Middle Bronze Age II, in: Scheftelowitz, N., Oren, R., (dir.), *Tell Kabri, the 1986-1993 excavation seasons*, 307-318.

Shalev, S., 2009. Metals and society: Production and distribution of metal weapons in the Levant during the Middle Bronze Age II, in: Rosen, S. and Roux, V., (dir.), *Techniques and People*, 69-80.

Shenberg, C., 1985. Analysis of the weapons by X-Ray Fluorescence method, in: Yogev, O., Another shaft tomb south of Tel Rehov. *Atiqot*, 17, 112.

Stacey, J., S., Doe R., B., Robertson R., J., Delevaux M., H., Gramlich, J., W., 1980. A lead isotope study of mineralization in the Saudi Arabian Shield. *Contrib Miner Petrol*, 74, 175–188.

Stech, T., Muhly, J., D., Maddin, R., 1985. Metallurgical studies on the artifacts from the tomb near 'Enan. *Atiqot*, 17, 75-82.

Stech, T., Pigott, V., 1986. The metal trade in southwest Asia in the third millennium B.C. *Iraq*, 48, 39-64.

Steinkeller, P., 1996. The organization of crafts in third millennia Babylonia: The case of the potters, *Archiv fur Orientforschung*, 23, 232-53.

Stone, E., C., 2005. Mesopotamian cities and countryside, in Snell D., C., (dir.), *A companion to the ancient Near East*, Blackwell Publishing, pp. 156-170

Stone, E., C., 1990. The tell Abu Duwari project, Iraq, 1987, *Journal of field archaeology*, 17 (2), 141-162.

Stone, E., C., and Zimansky, P., 1992. Mashkan-shapir and the anatomy of an Old Babylonian city, *the Biblical archaeologist*, 55(4), 212-218.

Stos-Gale, Z., A., 1989. Cycladic copper metallurgy. In: Hauptmann, A., Pernicka, E., Wagner, G., A., (dir) *Old World archaeometallurgy: proceedings of the International Symposium "Old World archaeometallurgy", Heidelberg 1987*. Der Anschnitt, Beiheft 7, Deutschen Bergbau-Museum Bochum, 44, pp. 279 – 291.

Stos-Gale, Z., A., Gale, N., H., 2003. Lead isotopic and other isotopic research in the Aegean. In: Foster, K., Laffineur, R., (dir.) *METRON, Proceedings of the 9th International Aegean Conference*, Yale 2002, pp 83–101.

Strommenger, E., Kohlmeyer, K., 1998. *Tall Bi'a - Tuttul - I. Die altorientalischen bestattungen*, SDV, Sarrebruck.

Subramanian, P., R., Laughlin, D., E., 1988. The As-Cu (arsenic-copper) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 9 (5), 605-617; 625-626.

Subramanian, P.R., Perepezko, J.H., 1993. The Ag-Cu (silver-copper) system. *Journal of Phase Equilibria*, 14 (1), 67-75.

Tallon, F., 1987. *Métallurgie susienne I. De la fondation de Suse au XVIIIe avant J.-C.* Editions de la Réunion des musées nationaux, Paris.

Thalman, J.-P., 1978. Tell Arqa (Liban Nord) campagnes I-III (1972-1974) chantier I. Rapport préliminaire. *Syria*, 55 (1), 1-151.

Thalmann J.-P., 2006. *Tell Arqa I: Les niveaux de l'Age du Bronze*, Bibliothèque Archéologique et Historique, 177, IFPO, Beyrouth.

Thomas, N., 2010. Cuivre, laiton, dinanderie mosane : Atelier et productions métallurgiques à Dinant et à Bouvignes du XIII^e au XVI^e siècle. *Archéopages*, Octobre 2010, hors série, 143-151.

Tufnell, O., Ward, W., A., 1966. Relations between Byblos, Egypt and Mesopotamia at the end of the third millennium B.C. A study of a Montet Jar. *Syria*, 43 (3-4), 165-241.

Tylecote, R., F., 1982. Metallurgical crucible and crucible slags, in : Olin, J., Franklin, A., (dir.), *Archaeological Ceramics*, Smithsonian Institute Press, Washington, pp. 231-243.

Tylecote, R., F., 1987. *The early history of metallurgy in Europe*, Longman, Londres.

Valbelle, D., 1992. L'artisan, in : Donadoni, S., (dir.), *L'homme Egyptien*, Paris, Editions du seuil, pp. 51-79.

Van de Mieroop, M., 1987. *Crafts in the Early Isin period: the study of the Isin craft Archive from the reigns of Išbi-erra and Šūilišu*, Leuven.

Villa, E., 2004. The fauna of Early Bronze Age Sidon. *Archaeology and Hisrory of Lebanon*, 19, 92-105.

Verheyden S., Nader F.,H., Cheng, H.,J., Edwards, L.,R., Swennen, R., 2008. Paleoclimate reconstruction in the Levant region from the geochemistry of a Holocene stalagmite from the Jeita cave, Lebanon, *Quaternary Research*, 70, 368-381.

Waetzoldt, H., 1990. Bewaffnung des Heeres von Ebla. *Oriens Antiquus* 29, 1-38.

Wattenmaker, P., 1998. Craft production and social identity in Northwest Mesopotamia, in : Costin C., L., and Wright, R., P., (dir.), *Craft and social identity*, *Archaeological Papers of the American Anthropological Association*, 8(1), pp. 47-55.

Weeks, L., 1999. Lead isotope analyses from Tell Abraç, United Arab Emirates: New data regarding the 'tin problem' in Western Asia. *Antiquity*, 73(279), 49 - 71.

Weeks, L., Keall, E., Pashley, V., Evans, J., Stock, S., 2009. Lead Isotope Analysis of Bronze age Copper base artefacts from Al-Midamman, Yemen: Towards the identification of an indigenous metal production and exchange system in the southern red sea region. *Archaeometry*, 51 (4), 576-597.

Weiss H., Courty M.-A., Wetterstrom, W., Guichard, F., Senior, L., Meadow, R., Curnow, A., 1993. The genesis and collapse of third millennium north Mesopotamian civilization, *Science* 261, 995-1004.

Wilkinson, T., J., 1994. The structure and dynamics of dry-farming states in Upper Mesopotamia, *Current Anthropology*, 35 (5), 483-520.

Woolley, L., 1934. *The Royal Cemetery: A Report on the Predynastic and Sargonid Graves Excavated Between 1926 and 1931*, Philadelphie.

Woolley, L., Mallowan, M., E., L., 1976. *Ur Excavations VII. The Old Babylonian Period*, Publications of the Joint Expedition of the British Museum and of the Museum of the University of Pennsylvania to Mesopotamia, Londres.

Wright, R., P., 1998. Crafting social identity in Ur III southern Mesopotamia, in : Costin C., L., and Wright, R., P., (dir.), *Craft and social identity*, Archaeological Papers of the American Anthropological Association, 8(1), pp. 56-69.

Yoffee, N., 1995. Political economy in early Mesopotamian states, *Annual reviews of anthropology*, 24, 281-311.

Zettler, R.,L., Horne, L., 1998. *Treasures from the Royal Tombs of Ur*, Philadelphie.

Annexe 1

T.a. 1

Dates av. J.-C.	Levant	Egypte	Mesopotamie du sud	Anatolie centrale
3500	Bronze Ancien I		Uruk Moyen Recent	
3250		Nagada III		
3000	Bronze Ancien II	Unification Epoque Thinite 1 ^e dynastie	Jemdet Nasr	Kültepe 18
2750		2 ^e dynastie	Dynastie Archaïque I	Kültepe 17
2500	Bronze Ancien III	Ancien Empire 3 ^e dynastie 4 ^e dynastie	Dynastie Archaïque II	Kültepe 16
		5 ^e dynastie	Dynastie Archaïque IIIA	Kültepe 15
		6 ^e dynastie	Dynastie Archaïque IIIB	Kültepe 14
2250	Bronze Ancien IV		Akkad	Kültepe 13 Kültepe 12
		1 ^e Pér. Int. ^a	Guti	Kültepe 11
2000	Bronze Moyen I	Moyen Empire 11 ^e dynastie	Ur III	Karum IV/III Kültepe 10
		12 ^e dynastie 13 ^e dynastie	Isin-Larsa	Karum II Karum Ib
1750	Bronze Moyen II		Paleo-Babylonien	

a- 1^e Periode intermédiaire

T.a. 2: Haches fenestrées

Arme	MNB ^a	Publi. ^b	contexte	état de l'objet ^c	poids	longueur maximale	longueur du collet	épaisseur min. collet	épaisseur max lame
Haches fenestrées étroites	6270	10645	dépôt σ	complet ^d	249 g	116 mm	53 mm	1 mm	20 mm
	6271	10646	dépôt σ	complet	208 g	108 mm	50mm	0.5mm	15 mm
	6272	10646	dépôt σ	incomplet ^e	135 g	81 mm	48 mm	1 mm	17 mm
	6273	10646	dépôt σ	incomplet	127 g	103 mm	N.D	0.7 mm	14 mm
	6281	7903	dépôt α	fragment ^f	17 g	35 mm	48 mm	0.7 mm	N.D
	8349	940	tombe n° 3	complet	233 g	118 mm	50 mm	1 mm	17 mm
	8350	14470	Lv VIII C9/11	incomplet	190 g	101 mm	61 mm	2 mm	16 mm
	9076	941	tombe n° 3	complet	173 g	101 mm	44 mm	1.5 mm	15 mm
	10794	N.D ^g	non-identifié	fragment	47 g	64 mm	N.D	N.D	12 mm
	26759	98.334-004	tombe 14.14	complet	425 g	123 mm	52 mm	N.D	N.D
77096	3028.1	tombe E 304	complet	262 g	121 mm	54 mm	1 mm	20 mm	
Haches fenestrées large	6320	9997	Lv VII C14/22	fragment	27 g	43 mm	N.D	N.D	4 mm
	10988	10826	dépôt χ	incomplet	112 g	72 mm	118 mm	1 mm	5 mm
	11655	8818	dépôt ε	incomplet	132 g	79 mm	99 mm	0.7 mm	7 mm
	11656	8819	dépôt ε	complet	211 g	83 mm	100 mm	1,2mm	8 mm
	11658	8817	dépôt ε	complet	177 g	77 mm	108 mm	1,2 mm	8 mm
	11708	10151	dépôt o	incomplet	157 g	83 mm	N.D	2 mm	8 mm

a- Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- Numéro d'inventaire de publication (Dunand, 1954, 1939; Montet, 1928; Thalmann, 2006; Monchambert, 2010); c- l'état actuel de l'objet (ne concerne pas la corrosion); d- Complet: aucune partie ne manque à l'objet; e- Incomplet: des parties de l'objet manquent mais la plupart de dimensions sont disponibles ; f- Fragment: la partie restante de l'objet ne permet pas d'effectuer toutes les mesures métriques; g- N.D: non disponible

T.a. 3: Poignards

Arme	MNB ^a	Publi. ^b	contexte	état de l'objet ^c	poids	longueur maximale	épaisseur min. tal/lan ^d	épaisseur max lame	largeur max lame
Poignards à lame simple	10293	8330	dépôt β	complet ^e	66 g	188 mm	1 mm	4 mm	42 mm
	11661	10142	dépôt o	incomplet ^f	86 g	232 mm	1 mm	5 mm	46 mm
	11671	10122	dépôt o	incomplet	49 g	149 mm	1 mm	4 mm	37 mm
	11686	10134	dépôt o	complet	65 g	203 mm	0.8 mm	5 mm	42 mm
	11697	10132	dépôt o	incomplet	47 g	145 mm	2 mm	4 mm	39 mm
	11854	9535	dépôt ι	incomplet	48 g	202 mm	1 mm	4 mm	34 mm
	56062	F. 721	chambre 2	incomplet	42 g	141 mm	N.D ^h	4 mm	35 mm
	27857	8365	dépôt γ	incomplet	32 g	101 mm	1 mm	2.5 mm	32 mm
Poignards à lame décorée	9021	9665	dépôt λ	incomplet	126 g	225 mm	1 mm	5 mm	52 mm
	10309	8342	dépôt β	fragment ^g	32 g	161 mm	N.D	3 mm	N.D
	10811	3806	bât. II sale C	incomplet	44g	172 mm	1 mm	3 mm	42 mm
	10831	18364	Lv XXIII C11/22	incomplet	33 g	164 mm	1 mm	5 mm	32 mm
	11930	8344	dépôt β	fragment	9 g	80 mm	0.4 mm	2 mm	N.D
	26757	98.334-001	tombe 14.14	complet	294 g	266 mm	N.D	N.D	55 mm
	27871	9654	dépôt λ	fragment	61 g	172 mm	N.D	3.5 mm	N.D
	27883	9658	dépôt λ	fragment	127 g	197 mm	N.D	5 mm	N.D
27092	9172	dépôt ζ	fragment	21 g	138 mm	N.D	3 mm	34 mm	

a, b, c, comme dans T.a. 2; d- Epaisseur minimale du talon ou de la languette; e- Complet: aucune partie ne manque à l'objet; f- quelques parties manquent mais la plupart de ces dimensions sont disponibles; g- la partie restante de l'objet ne permet pas d'effectuer toutes les mesures métriques; h- N.D: non disponible

T.a. 4: Pointe de lance à languette rivetée

Arme	MNB ^a	Publi. ^b	contexte	état de l'objet ^c	poids	longueur maximale	épaisseur min. tal/lan ^d	épaisseur max lame	largeur max lame
Pointes de lances à languette rivetée	9031	8374	dépôt γ	incomplet ^f	40 g	123 mm	2.5 mm	5 mm	N.D
	9046	9616	dépôt κ	incomplet	217 g	271 mm	4 mm	8 mm	41 mm
	9050	8361	dépôt γ	incomplet	34 g	103 mm	2 mm	5 mm	26 mm
	9051	8382	dépôt γ	incomplet	56 g	129 mm	2 mm	6 mm	32 mm
	10334	8418	dépôt γ	incomplet	119 g	225 mm	2 mm	6 mm	38 mm
	11102	10703	dépôt υ	complet ^e	88 g	171 mm	3 mm	7 mm	28 mm
	11109	10704	dépôt υ	complet	198 g	230 mm	7 mm	9 mm	41 mm
	11110	10698	dépôt υ	complet	182 g	241 mm	4 mm	9 mm	40 mm
	12320	8842	dépôt ε	incomplet	98 g	190 mm	3 mm	6 mm	45 mm
	12329	8837	dépôt ε	incomplet	120 g	230 mm	1 mm	7 mm	36 mm
12332	8839	dépôt ε	incomplet	85 g	227 mm	2 mm	5 mm	N.D	

a, b, c, comme dans T.a. 2; d- Epaisseur minimale de la languette; e- Complet: aucune partie ne manque à l'objet; f- quelques parties manquent mais la plupart de ces dimensions sont disponibles; g- la partie restante de l'objet ne permet pas d'effectuer toutes les mesures métriques; h- N.D: non disponible

T.a. 5: pointes de lances à douille longues et moyennes

Arme	MNB ^a	Publi. ^b	contexte	état de l'objet ^c	poids	longueur maximale	épaisseur max lame	épaisseur zone distale ^d	épaisseur zone centrale ^d	épaisseur zone proximale ^d	largeur lame
Pointes de lances larges	9028	9669	dépôt λ	fragment ^g	187 g	246 mm	14 mm	1.3 mm	N.D ^h	N.D	31 mm
	10268	8311	dépôt λ	fragment	95 g	207 mm	12 mm	1 mm	N.D	N.D	25 mm
	10336	8441	dépôt γ	fragment	85 g	199 mm	11 mm	0.4 mm	N.D	N.D	25 mm
	11856	9523	dépôt ι	incomplet ^f	230 g	404 mm	12 mm	1 mm	0.3 mm	N.D	30mm
	11913	8352	dépôt β	incomplet	399 g	453 mm	18 mm	2mm	N.D	N.D	36 mm
	11914	8346	dépôt β	incomplet	344 g	484 mm	15 mm	2 mm	N.D	0.5 mm	36 mm
	11921	8348	dépôt β	incomplet	465 g	555 mm	21 mm	N.D	N.D	N.D	32 mm
	26756	98.334-002	tombe 14.14	complet ^e	290 g	396 mm	14 mm	N.D	N.D	N.D	39 mm
	27855	9626	dépôt λ	fragment	187 g	260 mm	11 mm	1 mm	N.D	N.D	32 mm
	27856	9667	dépôt λ	fragment	137 g	296 mm	9 mm	1.5 mm	0.6mm	N.D	29 mm
27884	9632	dépôt λ	fragment	138 g	217 mm	10 mm	1.2 mm	N.D	N.D	26 mm	
Pointes de lances moyennes	10870	13854	Carré 8/12	complet ^e	200 g	216	11 mm	N.D	N.D	1 mm	35 mm
	10978	10834	dépôt χ	fragment	69 g	276 mm	8 mm	N.D	0.3 mm	N.D	37 mm
	77137	2028.1	sondage 2	fragment	66g	184 mm	9 mm	0.5 mm	N.D	N.D	N.D

a, b, c, comme dans T.a. 2; d- Epaisseur minimale de la zone distale, centrale et proximale; e- Complet: aucune partie ne manque à l'objet; f- quelques parties manquent mais la plupart de ces dimensions sont disponibles; g- la partie restante de l'objet ne permet pas d'effectuer toutes les mesures métriques; h- N.D: non disponible

T.a. 6: pointes de lances à douille courtes

Arme	MNB ^a	Publi. ^b	contexte	état de l'objet ^c	poids	longueur maximale	épaisseur max lame	épaisseur zone distale ^d	épaisseur zone centrale ^d	épaisseur zone proximale ^d	largeur lame
Pointes de lances courtes	10274	8288	dépôt β	complet	37 g	114 mm	6 mm	N.D	N.D	0.2 mm	28 mm
	10277	8298	dépôt β	complet	64 g	185 mm	6 mm	N.D	N.D	0.4 mm	24 mm
	10279	8282	dépôt β	complet	50 g	133 mm	5 mm	N.D	N.D	0.2 mm	20 mm
	10280	8291	dépôt β	incomplet	60 g	158 mm	6 mm	N.D	N.D	0.5 mm	25 mm
	10301	8289	dépôt β	incomplet	49 g	195 mm	4 mm	0.3	N.D	0.1	25 mm
	10303	8279	dépôt β	complet	24 g	124 mm	2 mm	N.D	N.D	0.3	23 mm
	10322	8434	dépôt γ	complet	80 g	155 mm	6 mm	N.D	N.D	N.D	26 mm
	10325	8432	dépôt γ	incomplet	52 g	164 mm	7 mm	N.D	N.D	0.5 mm	24 mm
	10810	4059	mur Lv XI/XX	fragment	34 g	132 mm	6 mm	0.3 mm	0.2 mm	N.D	25 mm
	10976	10839	dépôt χ	incomplet	66 g	160 mm	9 mm	N.D	0.3 mm	N.D	34 mm
	10977	10836	dépôt χ	incomplet	65 g	188 mm	10 mm	N.D	N.D	0.2 mm	34 mm
	10982	10846	dépôt χ	incomplet	49 g	184 mm	9 mm	N.D	N.D	N.D	31 mm
	10997	10845	dépôt χ	incomplet	91 g	173 mm	9 mm	N.D	0.4	N.D	42 mm
	11200	10105	dépôt ξ	complet	54 g	197 mm	8 mm	N.D	N.D	0.3 mm	20 mm
	56064	F 722	chambre 2	fragment	29 g	81 mm	8 mm	0.7 mm	N.D	N.D	27 mm
	56066	F 724	chambre 2	fragment	31 g	102 mm	9 mm	N.D	N.D	N.D	21 mm

a, b, c, comme dans T.a. 2; d- Epaisseur minimale de la zone distale, centrale et proximale; e- Complet: aucune partie ne manque à l'objet; f- quelques parties manquent mais la plupart de ces dimensions sont disponibles; g- la partie restante de l'objet ne permet pas d'effectuer toutes les mesures métriques; h- N.D: non disponible

T.a. 7: Composition des haches fenestrées étroites

num. MNB ^a	nb d'éch. ^c	N.A. ^d	Cu		Sn		As		Pb		Sb		Fe		S		Ni		Ag		Al	
			min	max	min	max	min	max	min	Max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
6270	1	3	83.5		7.8		1.2		6.8		n.d. ^d		n.d.		tr ^d		tr		n.d.		n.d.	
			83.0	83.9	7.7	7.9	1.2	1.3	6.2	7.2												
6271	3	22	92.8		4.0		n.d.		2.8		n.d.		n.d.		tr		tr		n.d.		tr	
			90.4	93.6	3.9	4.1			1.8	4.9					tr	tr	tr	tr			tr	tr
6272	1	2	72.7		3.4		3.5		20.4		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			72.3	72.9	3.3	3.4	3.5	3.5	20.1	20.7												
6273	2	9	89.0		8.0		1.1		0.7		n.d.		n.d.		tr		1.1		n.d.		n.d.	
			88.2	89.2	7.5	8.3	0.9	1.4	0.4	1.0					tr	tr	1	1.1				
6281	3	15	81.8		2.8		3.0		12.4		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			79.8	83.5	2.7	3.3	2.9	3.7	9.8	14.2												
8349	1	2	71.3		n.d.		4.8		23.3		n.d.		0.6		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			71.0	71.6			4.8	4.8	22.9	23.4			0.6	0.6								
8350	1	8	cr ^d		cr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
9076	1	7	cr		cr		n.d.		Cr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
10794	3	9	90.0		10.0		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			89.9	91.2	8.5	10.1																
26759	3	7	cr		cr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
77096	1	3	85.6		n.d.		5.7		8.4		n.d.		n.d.		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			85.1	86.1			5.5	5.9	8.1	8.7					tr	tr						

a-Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- nombre d'échantillons analysés; c- nombre d'analyses par échantillon; d- n.d.: non détecté; tr: teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%; cr; élément majeur détecté sur une matrice corrodée

T.a. 8: composition des haches fenestrées larges

numéro MNB ^a	nb d'éch. ^b	N.A. ^c	Cu		Sn		As		Pb		Sb		Fe		S		Ni		Ag		Al	
			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
6320	2	10	93.1		6.4		tr		n.d.		n.d.		n.d.		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			92.0	93.9	5.8	7.3	tr	tr							tr	tr						
10988	2	11	91.4		8.4		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		tr		n.d.		n.d.		tr	
			91.3	91.5	8.3	8.5									tr	tr					tr	tr
11655	1	2	97.0		n.d.		3.0		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			96.8	97.2			2.8	3.2														
11656	1	2	95.4		n.d.		4.6		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			95.4	95.4			4.6	4.6														
11658	1	2	97.0		n.d.		3.0		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			96.9	91.1			2.9	3.1														
11708	1	5	87.0		12.1		0.5		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		tr	
			86.3	87.2	11.9	12.3	tr	0.5														tr

a-Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- nombre d'échantillons analysés; c- nombre d'analyses par échantillon; d- n.d.: non détecté; tr: teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%; cr; élément majeur détecté sur une matrice corrodée

T.a. 9: Poignards à lame simples

numéro MNB ^a	nb d'éch. ^b	N.A. ^c	Cu		Sn		As		Pb		Sb		Fe		S		Ni		Ag		Al	
			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
10293	1	6	92.1		n.d.		6.9		n.d.		n.d.		tr		0.6		n.d.		n.d.		n.d.	
			91.5	92.6			6.7	7.5					tr	tr	tr	0.7						
11661	1	3	93.2		n.d.		6.0		tr		n.d.		tr		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			93.1	93.2			6.0	6.1	tr	tr			tr	tr	tr	tr						
11671	1	4	95.8		n.d.		2.6		tr		n.d.		0.9		tr		tr		n.d.		n.d.	
			95.4	96.1			2.6	2.8	tr	tr			0.9	1.1	tr	tr	tr	tr				
11686	1	2	88.3		10.4		1		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		tr		tr	
			88.1	88.4	10.4	10.4	0.9	1.2											tr	tr	tr	tr
11697	1	3	92.6		3.3		3.4		n.d.		n.d.		tr		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			92.2	92.8	3.1	3.4	3.3	3.5					tr	tr	tr	tr						
11854	1	2	97.0		n.d.		1.3		n.d.		n.d.		1.1		0.6		n.d.		n.d.		n.d.	
			96.8	97.1			1.2	1.4					1	1.1	0.6	0.6						
27857	1	2	89.1		9.9		tr		tr		n.d.		tr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			89	89.1	9.8	10.0																

a-Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- nombre d'échantillons analysés; c- nombre d'analyses par échantillon; d- n.d: non détecté; tr: teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%; cr; élément majeur détecté sur une matrice corrodée

T.a. 10: Poignards à lame décorée

numéro MNB ^a	nb d'éch. ^b	N.A. ^c	Cu		Sn		As		Pb		Sb		Fe		S		Ni		Ag		Al	
			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
9021	1	3	85.6		14.4		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			85.3	85.8	14.1	14.6																
10309	2	4	85.5		10.0		tr		3.8		n.d.		tr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			84.9	86.4	9.7	10.4	tr	0.5	2.5	4.8			tr	tr								
10811	4	9	95.8		n.d.		1.6		0.7		tr		1.7		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			95.5	96.0			1.4	1.7	0.6	0.8	tr	tr	1.7	1.8								
10831	4	6	92.6		1.3		3.8		0.5		0.9		n.d.		tr		0.9		n.d.		tr	
			92.2	93.6	1.2	1.4	3.6	4	0.4	0.5	0.7	1.0			tr	tr	0.8	0.9			tr	tr
11930	3	9	94.8		2.5		2		tr		n.d.		n.d.		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			93.7	95.0	2.4	2.7	1.7	2.1	tr	0.8					tr	0.6						
27871	1	6	84.7		15.3		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			84.5	84.8	15.1	15.4																
27883	1	5	84.5		15.5		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			84.1	85.0	14.9	15.8																

a-Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- nombre d'échantillons analysés; c- nombre d'analyses par échantillon; d- n.d: non détecté; tr: teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%; cr; élément majeur détecté sur une matrice corrodée

T.a. 11 : Pointe de lance à languette rivetée

num. MNB ^a	nb. d'éch. ^b	N.A. ^c	Cu		Sn		As		Pb		Sb		Fe		S		Ni		Ag		Al	
			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
9031	1	2	95.0		n.d.		4.3		n.d. ^d		n.d.		tr ^d		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			95.0	95.0			4.3	4.3					tr	tr	tr	tr						
9046	1	4	84.3		14.7		n.d.		0.7		tr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			83.7	84.8	14.4	15.0			0.7	0.8	tr	tr										
9050	1	2	96.8		tr		2.6		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		tr	
			96.7	96.9	tr	tr	2.5	2.6													tr	tr
9051	1	3	95.8		tr		2.9		n.d.		n.d.		0.5		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			95.7	96.0	tr	0.5	2.9	3.0					0.5	0.5	tr	tr						
10334	1	3	98.0		n.d.		1.5		n.d.		n.d.		tr		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			97.8	98.3			1.2	1.6					tr	tr	tr	tr						
11102	1	3	96.5		0.5		2.0		n.d.		tr		tr		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			96.3	96.6	0.5	0.6	1.7	2.1			tr	0.6	tr	0.5	tr	tr						
11109	1	3	97.1		n.d.		1.5		0.6		n.d.		0.6		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			97.0	97.4			1.2	1.6	0.6	0.6			0.6	0.7	tr	tr						
11110	1	2	96.0		tr		2.2		0.5		n.d.		0.7		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			95.7	96.2	tr	tr	2.0	2.3	0.5	0.5			0.7	0.7	tr	tr						
12320	1	4	87.3		6.6		0.5		4.8		n.d.		tr		tr		n.d.		n.d.		tr	
			84.5	89.5	6.4	6.8	0.5	0.6	1.9	7.0			tr	tr	tr	tr					tr	tr
12329	1	3	96.3		n.d.		3.1		n.d.		n.d.		tr		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			96.1	96.4			3.0	3.2					tr	tr	tr	tr						
12332	2	4	86.2		11.6		n.d.		2.2		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			85.6	86.5	11.2	11.9			1.9	2.3												

a-Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- nombre d'échantillons analysés; c- nombre d'analyses par échantillon; d- n.d.: non détecté; tr: teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%; cr; élément majeur détecté sur une matrice corrodée

T.a. 12: Pointes de lance à douille longues et moyennes

num. MNB ^a	nb. d'éch. ^b	N.A. ^c	Cu		Sn		As		Pb		Sb		Fe		S		Ni		Ag		Al	
			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
9028	2	4	84.4		15.4		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			83.8	84.5	15.3	15.5																
10336	1	3	85.5		12.2		0.5		1.4		n.d.		n.d.		n.d.		tr		tr		n.d.	
			85.4	85.6	12.0	12.4	0.5	0.6	1.2	1.5								tr	tr	tr	tr	
11856	3	6	85.9		13.8		n.d.		tr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			85.4	86.3	13.4	14.1			tr	tr												
11914	1	5	86.0		14.0		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			85.7	86.3	13.7	14.1																
26756	1	6	87.2		11.5		tr		0.8		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			85.4	89.2	9.5	13.2	tr	tr	0.7	1												
27855	1	4	87.9		12.1		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			87.7	88.1	11.9	12.3																
27856	2	7	87.5		12.5		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			86.6	88.0	12.0	13.0																
27884	2	4	84.9		15.1		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			84.5	85.2	14.8	15.4																
10870	1	2	95.7		1.6		1.8		tr		n.d.		0.5		n.d.		tr		n.d.		n.d.	
			95.6	95.8	1.5	1.6	1.8	1.8	tr	tr			0.5	0.5			tr	tr				
10978	2	5	91.2		7.8		tr		n.d.		n.d.		tr		tr		n.d.		tr		n.d.	
			91.2	91.2	7.7	7.9	tr	tr					tr	tr	tr	tr			tr	tr		
77137	1	3	90.7		8.9		n.d.		tr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			90.4	91.2	8.9	9			tr	0.7												

a-Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- nombre d'échantillons analysés; c- nombre d'analyses par échantillon; d- n.d: non détecté; tr: teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%; cr; élément majeur détecté sur une matrice corrodée

T.a. 13: Pointes de lance à douille courtes

num. MNB ^a	nb. d'éch. ^b	N.A. ^c	Cu		Sn		As		Pb		Sb		Fe		S		Ni		Ag		Al	
			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
10274	2	4	94.5		<i>n.d.</i>		4.5		<i>n.d.</i>		0.7		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>tr</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>	
			94.4	94.7			4.3	4.8			0.5	0.9					<i>tr</i>	<i>tr</i>				
10277	1	3	90.0		<i>n.d.</i>		10.0		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>	
			88.5	91.4			8.6	11.2														
10279	2	4	95.2		<i>tr</i>		3.4		<i>tr</i>		<i>n.d.</i>		0.9		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>	
			94.4	96.0	<i>tr</i>	<i>tr</i>	2.8	4.1	<i>tr</i>	<i>tr</i>			0.8	1.0								
10280	2	3	95.1		<i>n.d.</i>		3.2		<i>n.d.</i>		0.8		0.6		<i>tr</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>	
			94.6	95.5			2.9	3.6			0.7	1	0.6	0.6	<i>tr</i>	<i>tr</i>						
10301	1	7	97.0		<i>n.d.</i>		3.0		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>	
			96.7	97.4			2.6	3.3														
10303	2	6	94.8		<i>n.d.</i>		3.1		<i>n.d.</i>		2.1		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>	
			93.8	95.8			2.6	3.8			1.6	2.6										
10322	1	2	95.0		<i>n.d.</i>		4.5		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		0.5		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>	
			94.9	95.1			4.4	4.6							0.5	0.5						
10325	1	1	85.4		12.9		<i>tr</i>		0.8		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>n.d.</i>		<i>tr</i>		<i>n.d.</i>	

a-Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- nombre d'échantillons analysés; c- nombre d'analyses par échantillon; d- n.d: non détecté; tr: teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%; cr; élément majeur détecté sur une matrice corrodée

T.a. 14 : Pointes de lance à douille courtes

num. MNB ^a	nb. d'éch. ^b	N.A. ^c	Cu		Sn		As		Pb		Sb		Fe		S		Ni		Ag		Al	
			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
10810	3	16	96.0		0.7		2.5		n.d.		n.d.		0.8		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			95.1	96.7	0.6	0.9	2.2	2.9					tr	1.6								
10976	2	5	92.2		7.1		n.d.		n.d.		n.d.		tr		n.d.		n.d.		tr		n.d.	
			91.6	92.6	6.7	7.4							tr	tr					tr	tr		
10977	3	11	92.1		7.2		n.d.		n.d.		n.d.		tr		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			90.6	92.7	6.7	8.3							tr	tr	tr	tr						
10982	1	7	cr ^d		cr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
10997	1	2	90.5		8.1		0.7		n.d.		n.d.		tr		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			90.3	90.6	8	8.1	0.7	0.7					tr	tr	tr	tr						
11200	1	2	97.6		n.d.		2.1		n.d.		n.d.		tr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			97.5	97.7			2.1	2.1					tr	tr								
56064	1	3	90.7		7.5		0.6		0.9		n.d.		tr		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			90.4	91.1	7.2	7.8	0.6	0.7	0.8	1			tr	tr								
56066	1		93.3		4.6		1		0.5		n.d.		n.d.		tr		n.d.		tr		n.d.	
			92.9	93.8	4.3	5.0	0.9	1.1	tr	0.6					tr	tr			tr	tr		

a-Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- nombre d'échantillons analysés; c- nombre d'analyses par échantillon; d- n.d: non détecté; tr: teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%; cr; élément majeur détecté sur une matrice corrodée

T.a. 15: Brasures

num. MNB ^a	nb d'éch. ^b	N.A. ^c	Cu		Sn		As		Pb		Sb		Fe		S		Ni		Ag		Mg	
			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	Min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
10976	1	2	37.3		0.8		n.d.		0.5		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		61.2		0.3	
			36.9	37.6	0.7	0.9			0.5	0.5											61.0	61.4
10978	1	3	36.0		3.6		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		tr		n.d.		59.4		tr	
			35.7	36.3	3.5	3.7									tr	tr					59.2	59.5
10997	1	3	38.7		2.7		n.d.		0.6		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		57.7		0.3	
			34.2	43.5	2.4	2.9			0.5	0.7											53.4	62.1

a-Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- nombre d'échantillons analysés; c- nombre d'analyses par échantillon; d- n.d: non détecté; tr: teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%; cr; élément majeur détecté sur une matrice corrodée

T.a 16: Rivets

num. MNB ^a	nb d'ech. ^b	N.A. ^c	Cu		Sn		As		Pb		Sb		Fe		S		Ni		Ag		Al	
			max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
9021	1	3	81.7		17.0		tr		1.0		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
			81.4	82.2	16.6	17.3	tr	tr	0.9	1.0												
27857	1	3	95.6		n.d.		3.4		n.d.		n.d.		0.7		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			94.9	95.7			3.3	3.4					0.7	0.8	tr	tr						
11661	1	3	96.5		n.d.		2.4		tr		n.d.		0.5		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			96.4	96.6			2.4	2.5	tr	tr			0.4	0.5	tr	tr						
11671	1	3	96.7		tr		2.0		n.d.		n.d.		0.6		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			96.4	96.9	tr	tr	2.0	2.0					0.6	0.6	tr	tr						
11697	1	2	96.3		n.d.		2.3		n.d.		n.d.		1.0		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			96.3	96.4			2.2	2.3					1.0	1.0	tr	tr						
27657	1	2	96.5		n.d.		2.4		tr		n.d.		n.d.		tr		n.d.		n.d.		n.d.	
			96.1	96.8			2.4	2.5	tr	tr					tr	tr						

a-Numéro d'inventaire du Musée National de Beyrouth (Liban); b- nombre d'échantillons analysés; c- nombre d'analyses par échantillon; d- n.d: non détecté; tr: teneur entre 0.1 et 0.5 Wt.%; cr; élément majeur détecté sur une matrice corrodée

T.a. 17 : coulée

Série	type d'objet	type de moule	traitement préliminaire	alliage	longueur maximale ¹	largeur maximale	épaisseur maximale ²	épaisseur minimale ³	poids ⁴
première	hache fenestrée étroite de petite dimensions	pierre	séchage et application d'une couche de suie de bougie	CuSn9	98 mm	51 mm	11 mm	1.8 mm	175 g
	102 mm				52 mm	16 mm	2 mm	266 g	
	pointe de lance à douille courte			CuSn14	150 mm	19 mm	10 mm	1.5 mm	110 g
deuxième	pointe de lance à douille longue	terre cuite	séchage	CuSn14	245 mm	30 mm	14 mm	2 mm	330 g
	hache fenestrée étroite			CuSn9	101 mm	49 mm	20 mm	2 mm	383 g
					84 mm	103 mm	10 mm	2.2 mm	364 g
	pointe de lance à douille courte	pierre	séchage et application d'une couche de suie de bougie	CuSn9Pb10	149 mm	19 mm	10 mm	1 mm	109 g
	hache fenestrée étroite de petite dimensions				98 mm	49 mm	12 mm	2 mm	203 g
	hache fenestrée étroite de grande dimensions			104 mm	51 mm	16 mm	1.2 mm	277 g	
troisième	hache fenestrée étroite de petite dimensions	pierre	séchage	CuSn9Pb20	98 mm	49 mm	12 mm	1.8 mm	221 g
	hache fenestrée étroite de grande dimensions				104 mm	51 mm	17 mm	2.2 mm	340 g
quatrième	hache fenestrée étroite de grande dimensions	pierre	séchage	CuSn9	102 mm	53 mm	16 mm	2.1 mm	251 g

1- Longueur maximale de l'ébauche sans l'entonnoir de coulée

2- épaisseur maximale de la lame

3-épaisseur minimale de la partie d'emmanchement (collet et douille)

4-poids de l'ébauche avec l'entonnoir

T.a. 18: rapports des isotopiques du plomb

MNB ¹	Etat	Type	Pb206/Pb204	erreur 2σ	Pb207/Pb204	erreur 2σ	Pb208/Pb204	erreur 2σ	Pb208/Pb206	erreur 2σ	Pb207/Pb206	erreur 2σ
10268	C.C ²	L.D.L ⁵	18.449	0.007	15.658	0.007	38.607	0.016	2.09259	0.00024	0.84868	0.00009
11856	M.S ³	L.D.L	18.374	0.006	15.644	0.005	38.517	0.014	2.09632	0.00022	0.85143	0.00007
11913	C.C	L.D.L	18.494	0.005	15.654	0.004	38.601	0.013	2.08724	0.00025	0.84642	0.00007
11914	P.C ⁴	L.D.L	17.921	0.004	15.590	0.003	37.815	0.009	2.11009	0.00022	0.86992	0.00006
11921	C.C	L.D.L	17.747	0.005	15.567	0.004	37.579	0.012	2.11750	0.00028	0.87720	0.00007
27855	M.S	L.D.L	18.395	0.010	15.700	0.009	38.605	0.024	2.09865	0.00041	0.85348	0.00014
27856	M.S	L.D.L	18.439	0.007	15.655	0.006	38.598	0.015	2.09329	0.00025	0.84903	0.00008
27884	M.S	L.D.L	18.411	0.115	15.669	0.105	38.568	0.278	2.09478	0.00171	0.85106	0.00107
10977	M.S	L.D.B ⁶	18.476	0.006	15.641	0.005	38.646	0.014	2.09165	0.00022	0.84655	0.00006
10978	M.S	L.D.B	18.424	0.005	15.653	0.004	38.602	0.011	2.09520	0.00021	0.84960	0.00006
10982	M.S	L.D.B	18.447	0.005	15.656	0.004	38.628	0.011	2.09402	0.00026	0.84870	0.00007
10997	M.S	L.D.B	18.350	0.010	15.631	0.009	38.538	0.023	2.10013	0.00042	0.85182	0.00012
10274	M.S	L.D.C. / T 10 ⁷	17.322	0.005	15.456	0.005	36.937	0.012	2.13238	0.00022	0.89231	0.00008
10277	M.S	L.D.C ⁸	20.738	0.047	15.760	0.037	37.967	0.091	1.83083	0.00084	0.75996	0.00027
10279	M.S	L.D.C. / T 10	18.567	0.005	15.635	0.004	38.652	0.013	2.08177	0.00021	0.84209	0.00007
10280	M.S	L.D.C	18.044	0.004	15.599	0.004	37.968	0.010	2.10421	0.00024	0.86448	0.00007
10301	M.S	L.D.C. / T 10	17.613	0.034	15.497	0.031	37.256	0.078	2.11526	0.00105	0.87985	0.00041
6273	M.S	H.F.E ⁹	18.653	0.005	15.704	0.004	38.840	0.012	2.08224	0.00023	0.84188	0.00007
27902	C.C	P ¹⁰	18.577	0.004	15.704	0.004	38.795	0.011	2.08835	0.00021	0.84536	0.00006
26757	C.C	P	17.432	0.005	15.485	0.004	37.100	0.012	2.12829	0.00023	0.88830	0.00007
26759	C.C	H.F.E	18.537	0.016	15.662	0.014	38.691	0.035	2.08725	0.00042	0.84492	0.00017

1-MNB.: Numéro d'inventaire du Musée National de Beirut

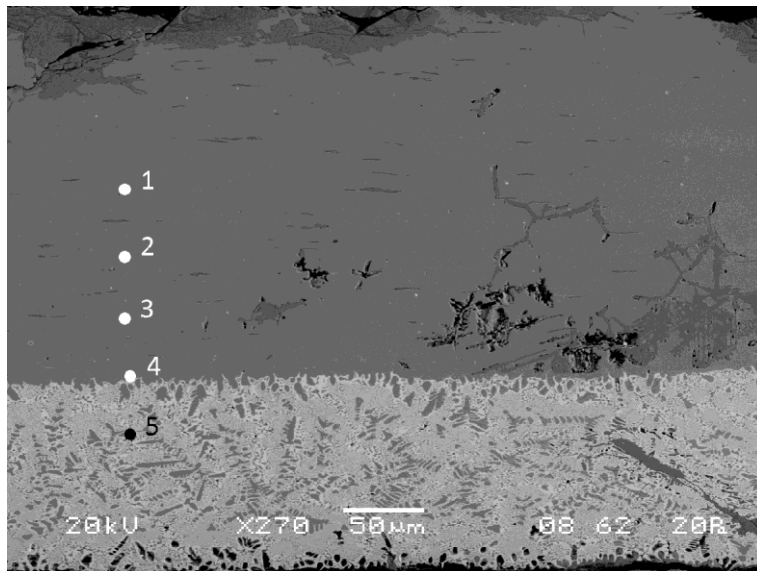
2-CC: Complètement corrodé; 4-MS: Métal sain; 4-PC: Partiellement corrodé

5-LDL: Lance à douille longue; 6-LDM: Lance à douilles présentant une brasures; 7-LDC/T 10: Lance à douille de Type 10 (Philip, 1989; 96)

8-LDC: Lance à douille courte; 9-HFE: Hache fenestrée étroite; 10-P: Poignard

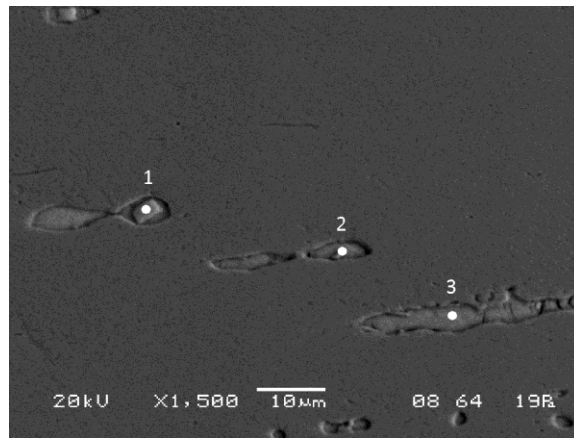
Annexe 2

A.a. 1: Analyses élémentaires de la brasure et de la plaque ajoutée de la pointe de lance à douille 10976 (Imagerie MEB)



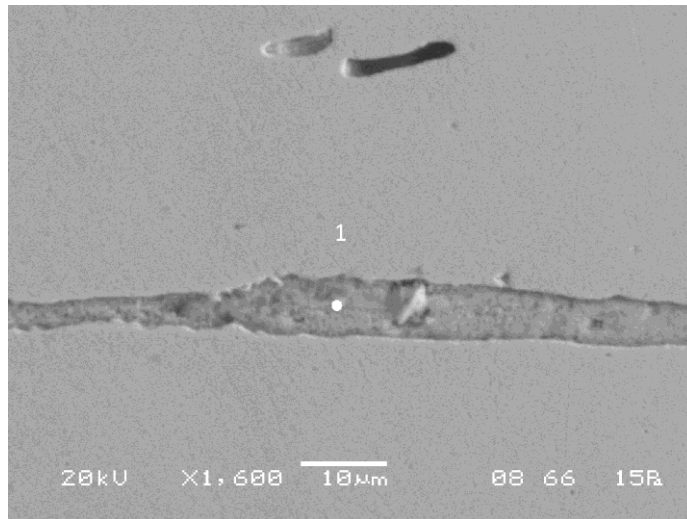
10976	Mg	Al	S	Fe	Ni	Cu	As	Ag	Sn	Sb	Pb
Point 1	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>	90.29	<i>n.d.</i>	1.04	8.42	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
Point 2	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>	91.01	<i>n.d.</i>	1.45	7.21	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
Point 3	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>	90.31	<i>n.d.</i>	2.36	7.03	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
Point 4	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>	85.92	<i>n.d.</i>	12.14	1.71	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
Point 5	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	52.12	<i>n.d.</i>	45.92	1.32	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>

A.a. 2: Composition de trois inclusions riches arsenic et en antimoine de la pointe de lance à douille 10274 (Imagerie MEB).



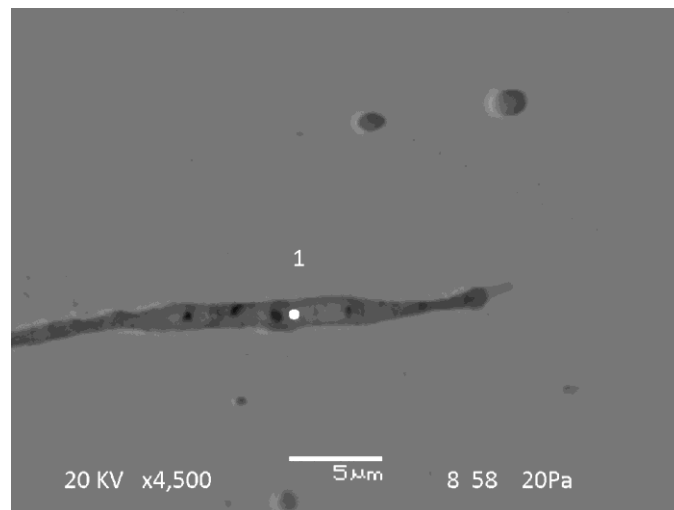
10274	Al	S	Fe	Ni	Cu	As	Ag	Sn	Sb	Pb
inclusion 1	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	13.8	16.6	24.9	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	43.4	1
inclusion 2	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	1.3	35.2	33.8	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	22.6	7.1
inclusion 3	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>tr</i>	<i>n.d.</i>	16.6	44.9	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	28.8	9.6

A.a. 3 : Composition d'une inclusion riche en arsenic de la pointe de lance à douille 10277 (Imagerie MEB).



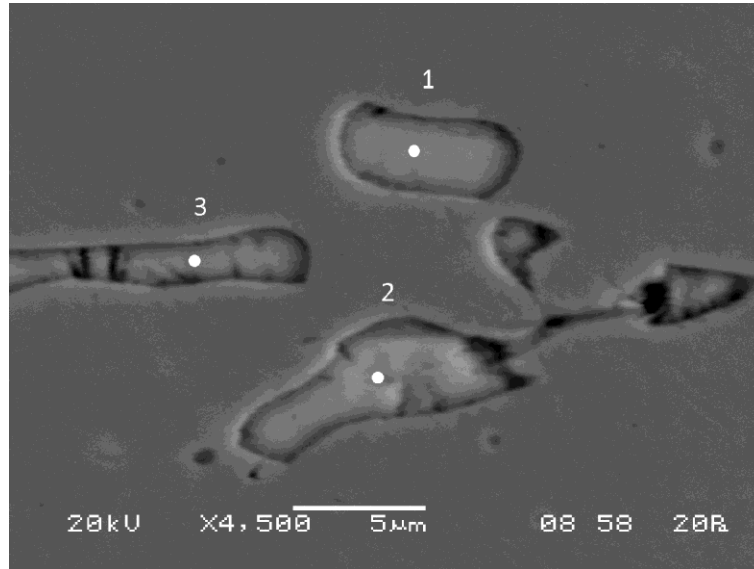
10277	Al	S	Fe	Ni	Cu	As	Ag	Sn	Sb	Pb
inclusion 1	tr	n.d.	n.d.	n.d.	13.36	86.25	n.d.	n.d.	tr	n.d.

A.a. 4: Composition d'une inclusion riche en arsenic et en antimoine de la pointe de lance à douille 10301 (Imagerie MEB).



10301	Al	S	Fe	Ni	Cu	As	Ag	Sn	Sb	Pb
inclusions 1	n.d.	tr	n.d.	n.d.	68.9	22.0	n.d.	n.d.	8.9	n.d.

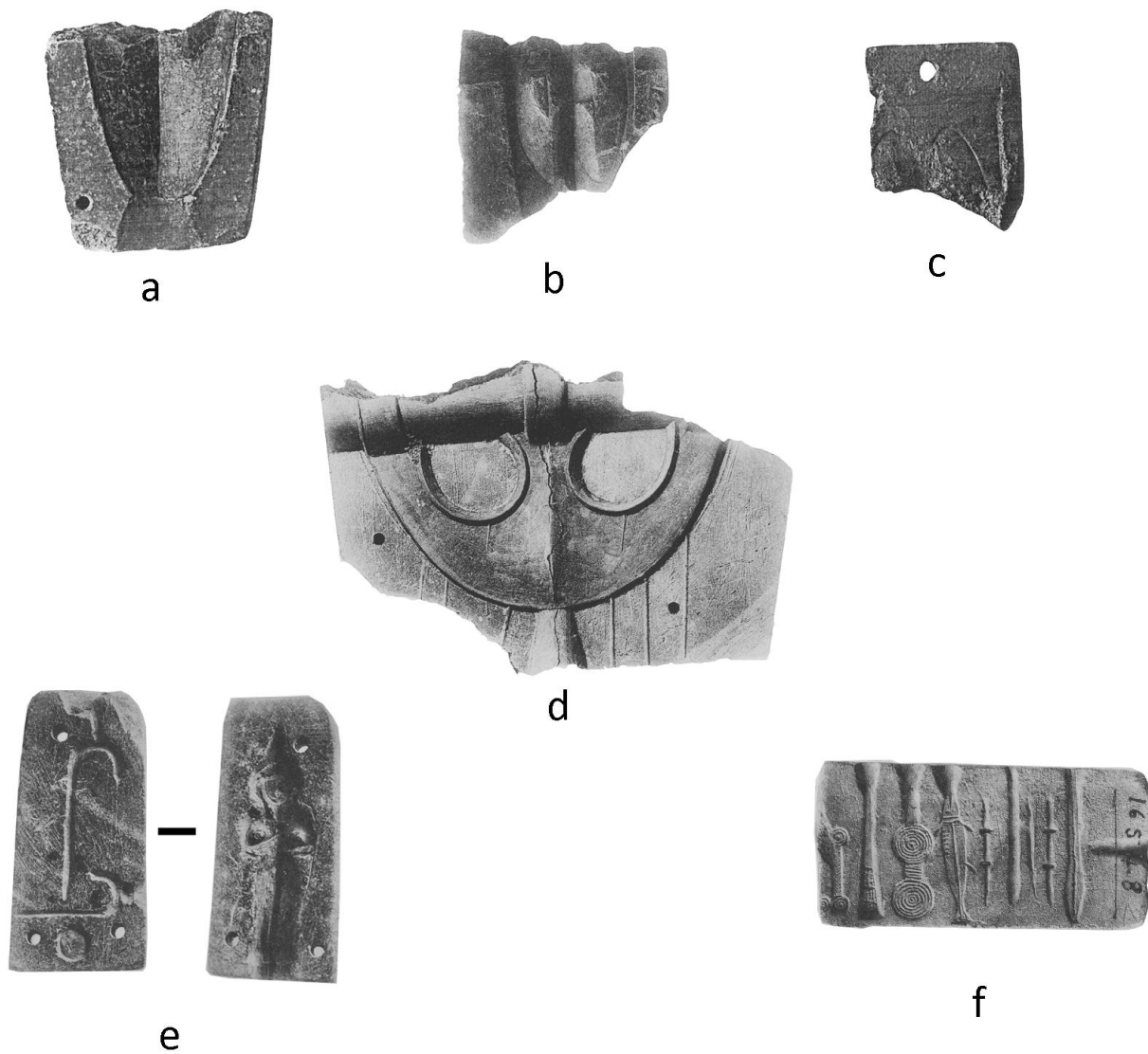
A.a. 5: Composition de trois inclusions riches en arsenic et en antimoine de la pointe de lance à douille 10303 (Imagerie MEB).



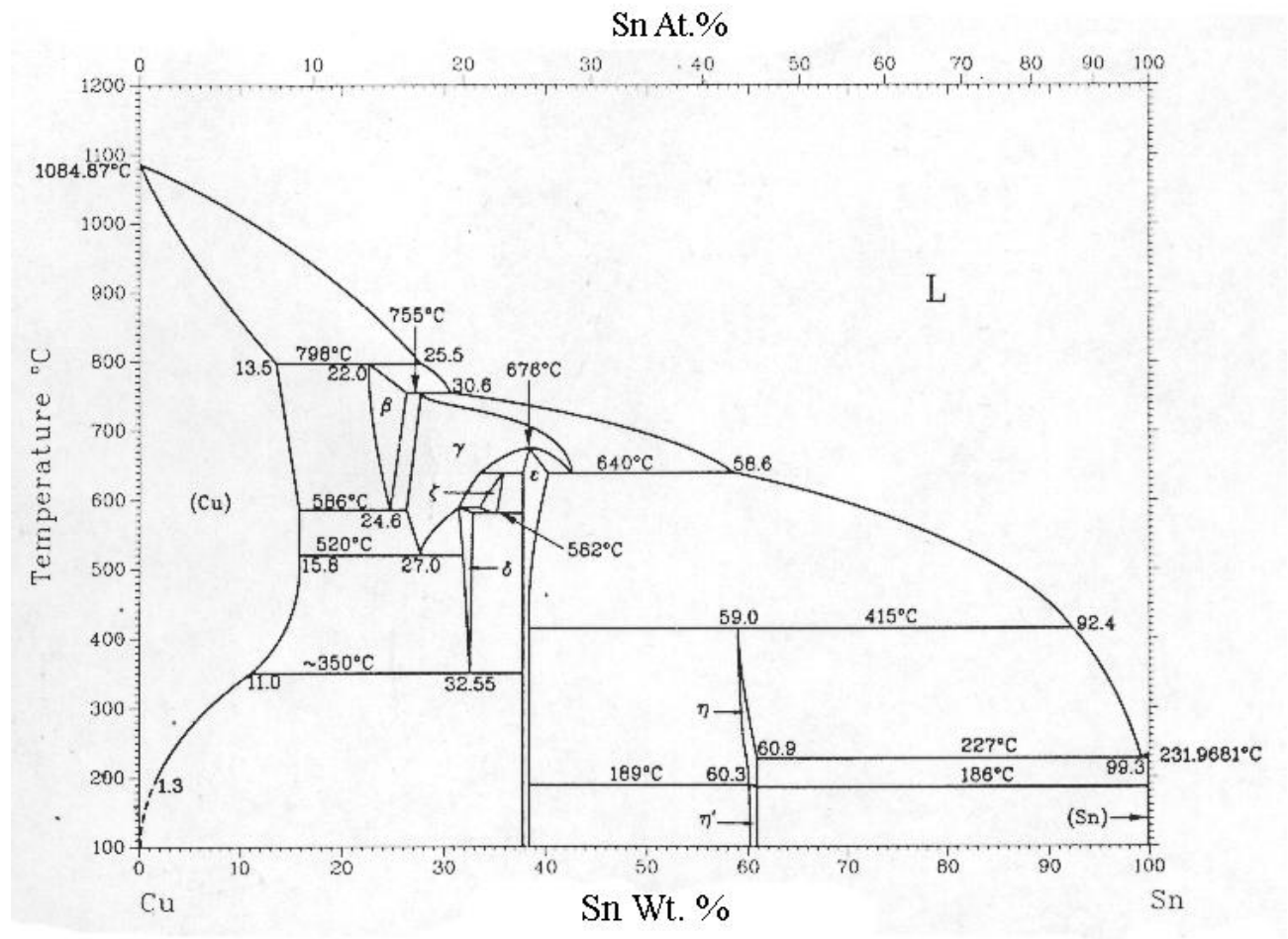
10303	Al	S	Fe	Ni	Cu	As	Ag	Sn	Sb	Pb
inclusion 1	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	0.64	<i>n.d.</i>	21.51	23.56	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	54.29	<i>n.d.</i>
inclusion 2	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	0.85	<i>n.d.</i>	20.73	23.43	<i>n.d.</i>	0.5	54.52	<i>n.d.</i>
inclusion 3	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	0.72	<i>n.d.</i>	22.78	23.68	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	52.83	<i>n.d.</i>

Annexe 3

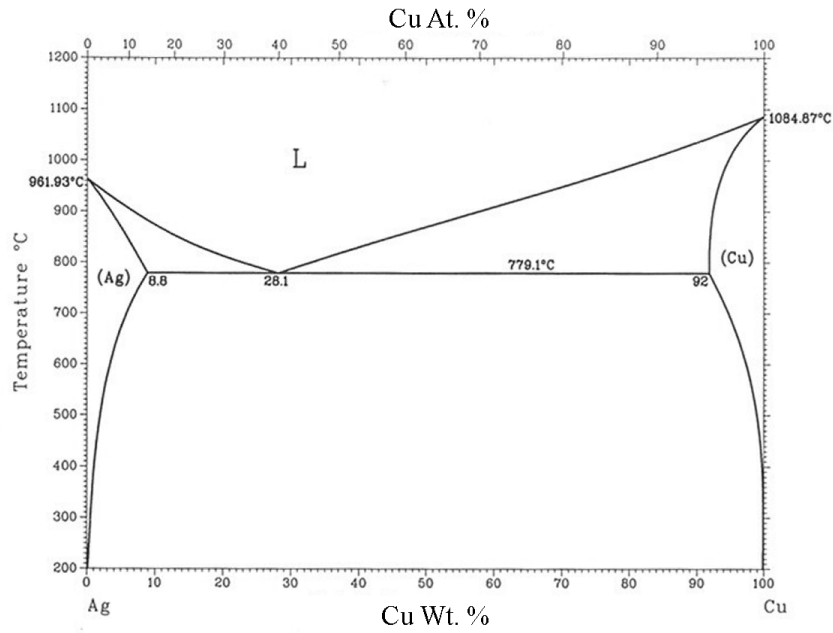
ill. 1: moules de Byblos (Dunand, 1937; pl. 108, 1950 ; pl. 184). a, b, c- fragments de moules de haches fenestrées étroites. L'entonnoir de coulée est connecté à la pointe de la lame ; d- moules de hache fenestrée large présentant des trous de fixation, des événements et un entonnoir de coulée ; e- moule présentant sur une face l'empreinte d'une figurine et sur l'autre deux empreintes d'objets recourbés ; f- moule de « bijoux » à plusieurs empreintes et entonnoirs de coulée.



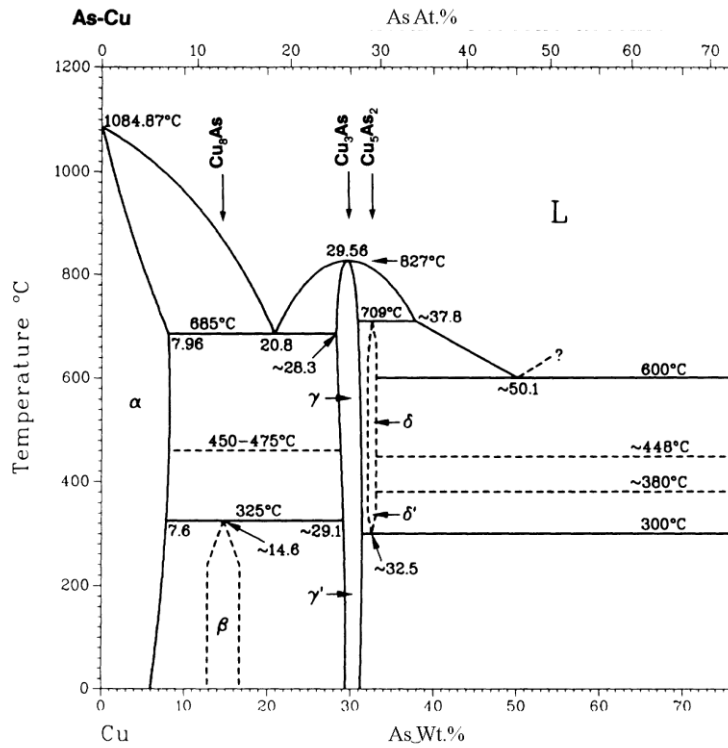
ill. 2: diagramme de phase binaire du CuSn (bronze) d'après Saunders et Miodownick (1990.)



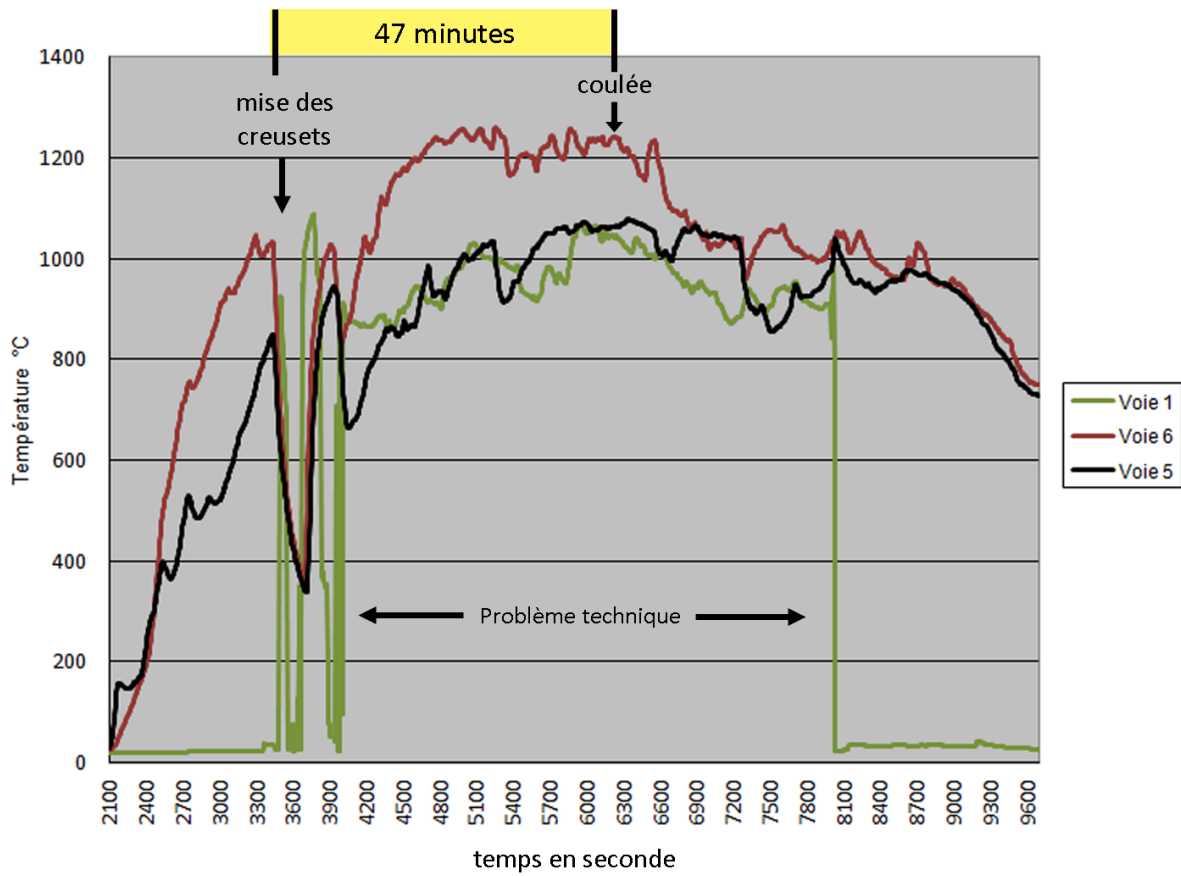
ill. 3: diagramme de phase binaire du AgCu (alliage argent-cuivre) d'après Subramanian et Perepezko (1993)



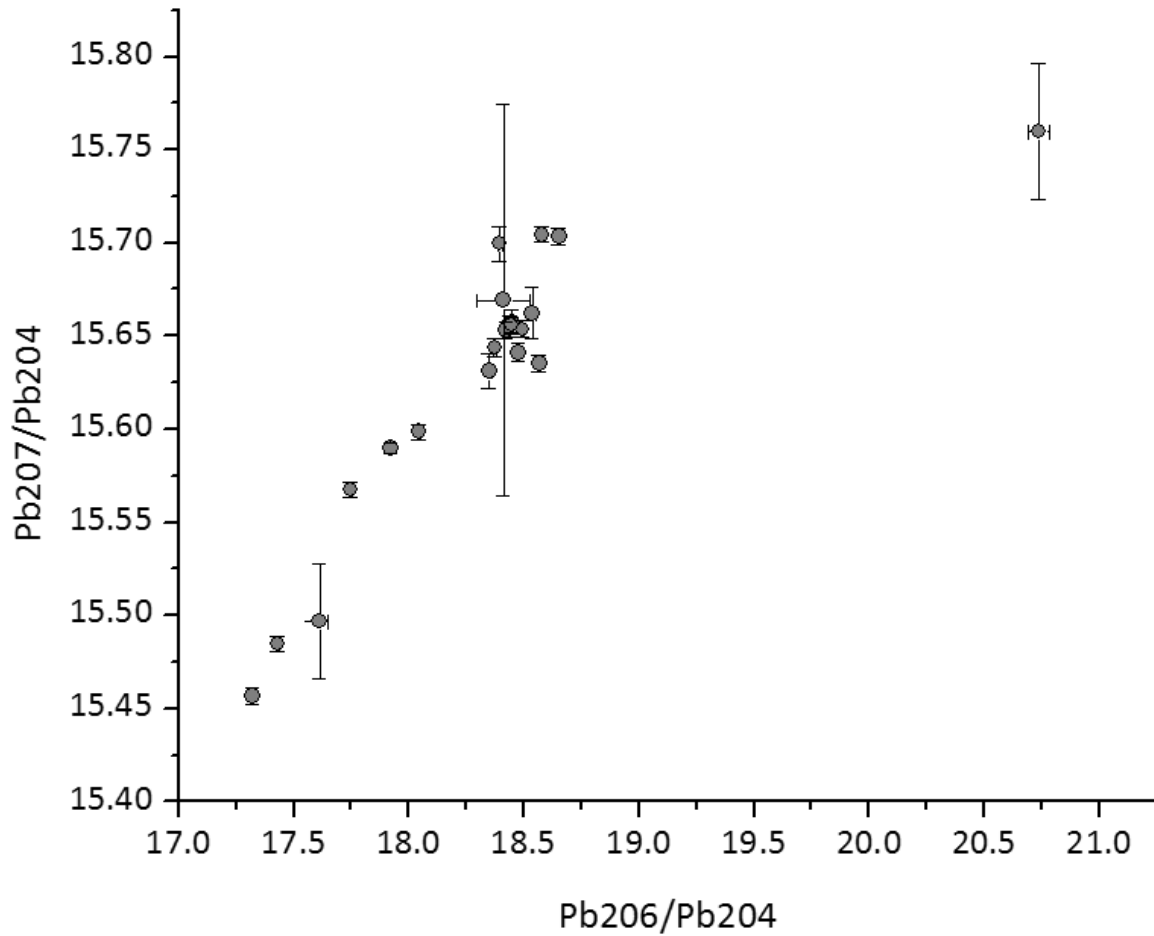
ill. 4: diagramme de phase binaire du CuAs (cuivre à l'arsenic) d'après Subarmanian et Laughlin (1988).



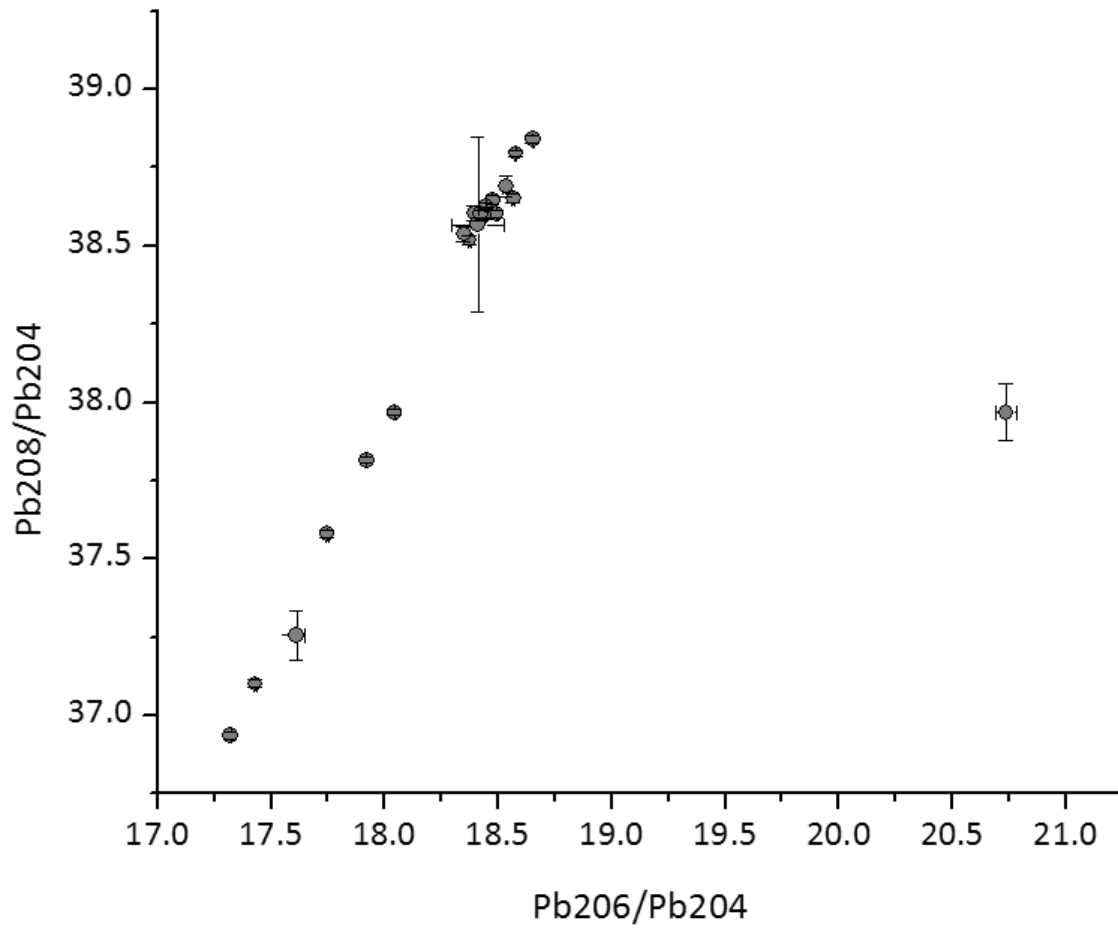
ill. 5: Variation de la température du four durant la deuxième série de coulée. Les voies 1, 5 et 6 représentent les acquisitions des trois thermocouples



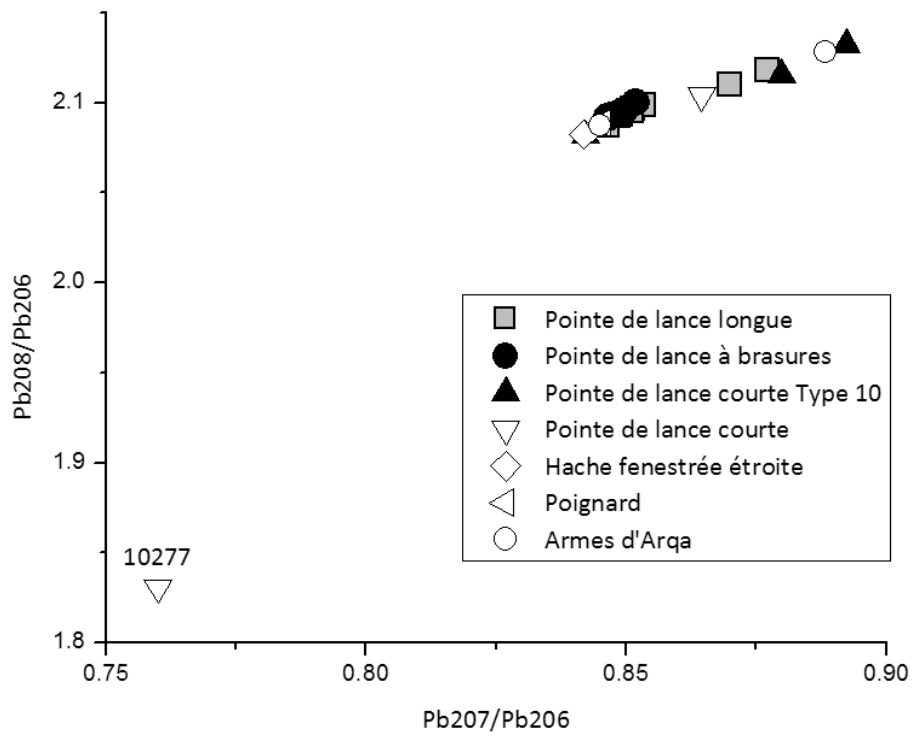
ill. 6: diagramme $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ présentant les rapports des isotopes du plomb des armes Byblos et de Arqa et leurs incertitudes. Les incertitudes les plus importantes sont celles de 10277, 10301, 10303 et 27884.



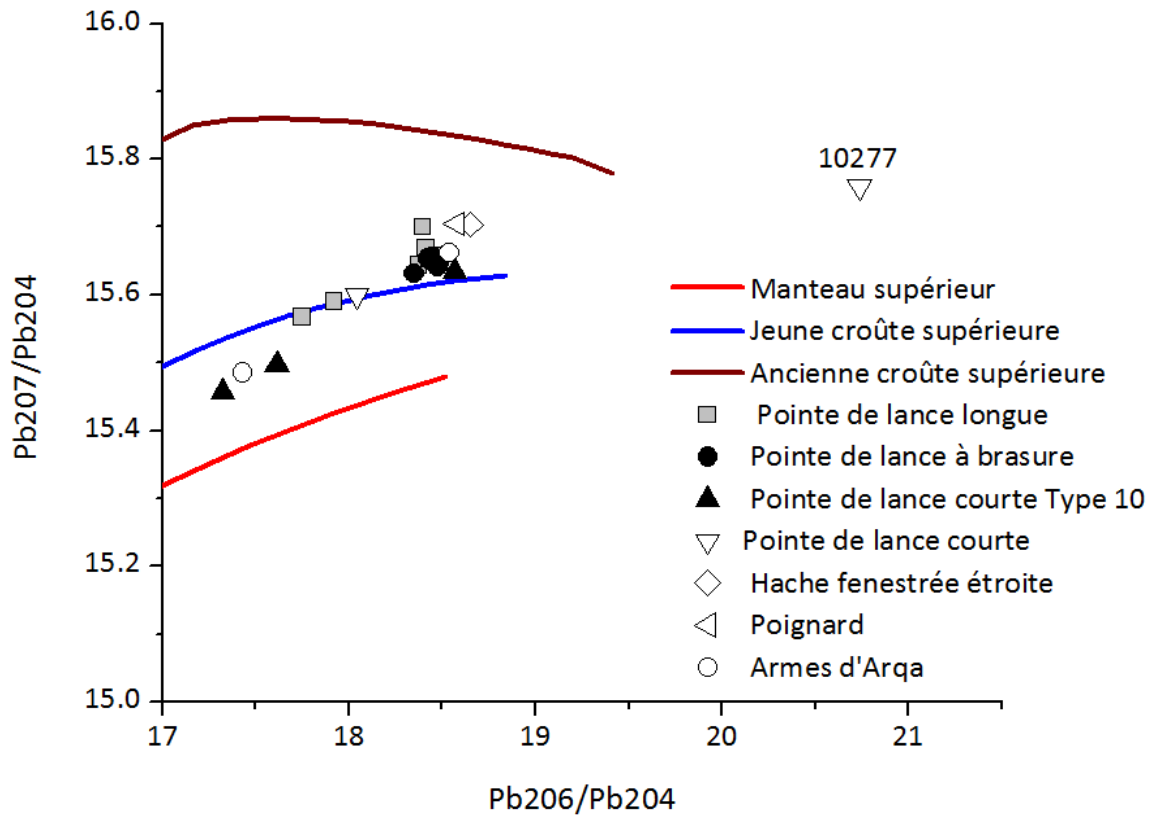
ill. 7: diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ présentant les rapports des isotopes du plomb des armes Byblos et de Arqa et leurs incertitudes. Les incertitudes les plus importantes sont celles de 10277, 10301, 10303 et 27884



ill. 8: diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ montrant les rapports des isotopes du plomb selon les différents types d'armes. Notons l'écartement important du rapport isotopique de la pointe de lance à douille courte 10277 du reste des armes.



ill. 9:diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montrant les rapports des isotopes du plomb selon les différents types d'armes. Notons l'incohérence du rapport isotopique de la pointe de lance à douille courte 10277 avec le modèle de Karmers et Tolstikhin (1997).



ill. 10 : Four utilisé dans les récréations expérimentales à Barsy



Annexe 4



Middle Bronze Age metallurgy in the Levant: evidence from the weapons of Byblos

Ziad EL Morr*, Michel Pernot

Institut de Recherche sur les Archéomatériaux (IRAMAT-CRPA), UMR5060, CNRS, Université Bordeaux 3, Esplanade des Antilles, 33607, Pessac Cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 March 2011

Received in revised form

2 May 2011

Accepted 20 May 2011

Keywords:

Metallurgy

Copper base alloy

Technology

Weapons

Middle Bronze Age

Levant

Byblos

ABSTRACT

This paper constitutes a synthesis of a technological investigation on copper base alloy weapons from Byblos. Most of the weapons are typical of the Middle Bronze Age in the Levant. Methods such as metallographic examination and chemical analyses by EDS were used to identify the different stages of the *chaîne opératoire* used in the making of these weapons. The results reveal precise information regarding the production of several types of weapons such as the type and performance of the moulds used for casting and the deformation process. Furthermore, these results highlight the contribution of economic and cultural factors in the choice of components in a copper base alloy recipe. Finally, the use of silver–copper brazes for joining copper base alloy objects is recorded for the first time for the period and region concerned.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Following what many archaeologists qualify as a period of “crises”, the beginning of the Middle Bronze Age (roughly around 2000 B.C.) witnessed the regeneration of complex urban societies all across the Levant (Akkermans and Schwartz, 2003). This new period is accompanied by the appearance of new types of weapons, such as fenestrated axes and socketed spearheads, displaying new shapes and hafting systems (Gernez, 2007). According to previous studies such as Moorey and Schweizer (1972), Rosenfeld et al. (1997) and Philip et al. (2003), the frequent use of bronze (CuSn) in this area began in this period or slightly before (Early Bronze Age IV). The large-scale introduction of new alloy recipes and weapons makes the Middle Bronze Age an interesting period for the study of the Levant metallurgy. Studies investigating the metallurgical know-how used in the production of copper base alloy objects from Middle Bronze Age Levant were mostly concentrated on Palestine and Transjordan (Khalil, 1980; Philip, 1991, Philip et al., 2003; Rosenfeld et al., 1997; Shalev, 2000, 2009). In contrast with this substantial body of data concerning southern Levant metallurgy,

only few studies (Moorey and Schweizer, 1972; Philip, 1991) have investigated northern Levant. The region of Lebanon in particular suffers from the scarcity of information regarding copper base alloy metallurgy. Therefore, weapons from Byblos were chosen to investigate the different technological aspects of copper base alloy metallurgy. This site has delivered the largest quantity of Middle Bronze Age weapons in all the Levant.

The site of Byblos is situated on the eastern coast of the Mediterranean, about 40 km north of Beirut the capital of Lebanon. In the Middle Bronze Age, Byblos was a small prosperous city with several religious structures (Huot et al., 1990). These structures yielded several deposits containing more than 400 weapons.

Most of the weapons presented in this paper were found in the *dépôts des offrandes* (Dunand, 1954). These 22 temple deposits constitute sealed and chronologically coherent archaeological contexts dating back to the beginning of the Middle Bronze Age (Saghieh, 1983: 132). Most of the remaining weapons were discovered in *warrior tombs* (Montet, 1928) and other less defined archaeological contexts (Dunand, 1939, 1954).

2. Presentation of the corpus

In this paper, 57 weapons including fenestrated axes, daggers, socketed spearheads and riveted spearheads are investigated. These weapons will be presented here by their inventory numbers

* Corresponding author. Tel.: +33 5 57121084; fax: +33 5 57124550.

E-mail addresses: ziad_el_murr@hotmail.com (Z.EL Morr), mpernot@u-bordeaux3.fr (M. Pernot).

given by the National Museum of Beirut. The corresponding publication numbers, as cited in Montet (1928) and Dunand (1939, 1954), are given in Tables 1–6. Most of them (except spearhead 10810, fenestrated axes 10794 and 6320) were found in well defined MB I (c. 2000–1800 B.C.) contexts. None of these weapons displays wear traces on the blade part. However a large number of those objects contained wooden remains and copper base alloy rivets demonstrating that some of these weapons were hafted. The current state of each weapon, its archaeological context, typology and some of its technologically relevant dimensions are given in Tables 1–3. The typological designations used in this paper are based on the work of Philip (1989).

The fenestrated axes (Table 1) are shaft-hole axes with two fenestrations located between a collar and a rounded blade. The 15 fenestrated axes presented here can be divided into nine duckbill axes (Fig. 1a), an elongated variant, and six D-shape axes (Fig. 1b) which are a broad variant. The collar in both variants displays a minimum thickness varying between 0.5 mm and 2 mm.

Most of the twelve daggers (Table 2) studied here have simple shapes and variable dimensions. The blade (Fig. 1c and d) has a midrib and the hilt is either a tang or a butt. The handle is fixed to the hilt by a maximum of three rivets. Although typologically they might belong to different categories (Type 16, 30 and 32), they will be considered here as one set as they do not display any technological differences. However, four daggers presenting blades with two central ribs (Fig. 1e) separated by a groove will be distinguished from the rest as they represent a more elaborate decoration (Fig. 2a). In this paper they are designated as double-ribbed daggers (Type 12).

The shape of riveted spearheads (Fig. 1f) is very similar to daggers. They display a blade with a midrib, a rectangular tang and one or several rivet holes (Philip, 1989: 83). However, they are generally much more robust (Table 2).

The 18 socketed spearheads (Table 3) presented in this paper have massive midribs and could be divided according to their length into three variants: seven large socketed spearheads (Fig. 1g), a variant longer than 35 cm, one medium socketed spearhead (Fig. 1h), between 20 cm and 35 cm, and ten small

socketed spearheads (Fig. 1i) representing a variant shorter than 20 cm. In order to obtain a precise technological reading the socket is considered to be divided into three zones equal in length (Fig. 2b); the “lower zone” which is the part of the socket that is directly connected to the blade, the “central zone” and the “upper zone” at the extremity of the socket. The socket is separated by a thin longitudinal gap. The areas of the socket forming the gap sides are called “joint surfaces”.

3. Method

Ninety-four samples were collected by cutting small pieces of metal with a fine jeweler’s saw. They represent the different parts of the weapons. The samples were mounted, then ground and polished to a 0.25 µm diamond finish in order to create a surface suitable for metallographic observations and chemical analyses.

Reflected light microscopy was used to perform metallographic observations. The grain boundaries of the crystalline structure were revealed by etching the polished surface with an alcoholic ferric chloride solution as described by Scott (1991: 72).

Additional observations and the characterisation of the alloy composition were carried out using SEM-EDS (JEOL JMS 6460 LV with an Oxford X-Max EDS Silicon Drift Detector). The operating condition is an acceleration voltage of 20 kV in a “Low Vacuum” environment (20 Pa). In the cases where arsenic and lead are present in the same sample, the As *L* ray series and the Pb *M* ray series were used for EDS analyses as the As *K* ray series and Pb *L* ray series line overlap. In the present paper the sum of the measured amounts, expressed in weight percentage, is normalised to 100%. Although results of elementary composition below 0.5 wt% lack quantitative precision, they are mentioned in the general composition as they hold qualitative information. Each result displayed in Tables 4–6 represents the average of all the measurements made on the different samples taken from each weapon. The size of the measurement area and the number of global analyses performed on each sample depend on the shape and dimensions of the observed sample surface as well as the corrosion infiltration inside the sample. Generally, the largest area of measurement containing

Table 1
State of preservation, dimensions and typology of fenestrated axes.

Weapons	Inventory number ^a	Publication number ^b	Context	Current state ^c	Weight (g)	Preserved length	Collar length (mm)	Min collar thickness (mm)	Max blade thickness (mm)	Type ^d
Duckbill axes	6270	10645	Deposit σ	Complete ^e	249	116	53	1	20	1
	6271	10646	Deposit σ	Complete	208	108	50	0.5	15	1
	6272	10646	Deposit σ	Incomplete ^f	135	81	48	1	17	1
	6273	10646	Deposit σ	Incomplete	127	103	N.A.	0.7	14	1
	6281	7903	Deposit α	Fragment ^g	17	35	48	0.7	N.A.	1
	8349	940	Tomb nb 3	Complete	233	118	50	1	17	1
	8350	14470	Lv VIII C9/11	Incomplete	190	101	61	2	16	1
	9076	941	Tomb nb 3	Complete	173	101	44	1.5	15	1
	10794	N.A. ^h	Unidentified	Fragment	47	64	N.A.	N.A.	12	1
	D-Shape axes	6320	9997	Lv VII C14/22	Fragment	27	43	N.A.	N.A.	4
10988		10826	Deposit χ	Incomplete	112	72	118	1	5	2
11655		8818	Deposit ε	Incomplete	132	79	99	0.7	7	2
11656		8819	Deposit ε	Complete	211	83	100	1.2	8	2
11658		8817	Deposit ε	Complete	177	77	108	1.2	8	2
11708		10151	Deposit σ	Incomplete	157	83	N.A.	2	8	2

^a Inventory number for archaeological objects situated in the National Museum of Beirut (Lebanon).

^b Inventory number given and published by the site archaeologists (Dunand, 1954, 1939; Montet, 1928).

^c Current state of the object. Does not refer to its corrosion.

^d The types have been defined by Philip (1989).

^e Complete: the object is not missing any part.

^f Incomplete: the object is missing some parts but most of its dimensions are still available.

^g Fragment: only a part of the object remains.

^h N.A.: not available.

Table 2

State of preservation, dimensions and typology of daggers, double-ribbed daggers and riveted spearheads.

Weapons	Inventory number ^a	Publication number ^b	Context ^c	Current state	Weight (g)	Preserved length (mm)	Min hilt thickness (mm)	Max blade thickness (mm)	Max blade width (mm)	Type ^d
Daggers general	10293	8330	Deposit β	Complete ^e	66	188	1	4	42	30
	11661	10142	Deposit σ	Incomplete ^f	86	232	1	5	46	32
	11671	10122	Deposit σ	Incomplete	49	149	1	4	37	30
	11686	10134	Deposit σ	Complete	65	203	0.8	5	42	32
	11697	10132	Deposit σ	Incomplete	47	145	2	4	39	16
	11854	9535	Deposit ι	Incomplete	48	202	1	4	34	30
	11930	8344	Deposit β	Fragment ^g	9	80	0.4	2	N.A. ^h	N.A.
	27857	8365	Deposit γ	Incomplete	32	101	1	2.5	32	30
Double-ribbed daggers	9021	9665	Deposit λ	Incomplete	126	225	1	5	52	12
	10309	8342	Deposit β	Fragment	32	161	N.A.	3	N.A.	12
	27871	9654	Deposit λ	Fragment	61	172	N.A.	3.5	N.A.	12
	27883	9658	Deposit λ	Fragment	127	197	N.A.	5	N.A.	12
Riveted spearheads	9031	8374	Deposit γ	Incomplete	40	123	2.5	5	N.A.	
	9046	9616	Deposit κ	Incomplete	217	271	4	8	41	
	9050	8361	Deposit γ	Incomplete	34	103	2	5	26	
	9051	8382	Deposit γ	Incomplete	56	129	2	6	32	
	10334	8418	Deposit γ	Incomplete	119	225	2	6	38	
	11102	10703	Deposit ν	Complete	88	171	3	7	28	
	11109	10704	Deposit ν	Complete	198	230	7	9	41	
	11110	10698	Deposit ν	Complete	182	241	4	9	40	
	12320	8842	Deposit ϵ	Incomplete	98	190	3	6	45	
	12329	8837	Deposit ϵ	Incomplete	120	230	1	7	36	
12332	8839	Deposit ϵ	Incomplete	85	227	2	5	N.A.		

^a Inventory number for archaeological objects situated in the National Museum of Beirut (Lebanon).^b Inventory number given and published by the site archaeologists (Dunand, 1954, 1939; Montet, 1928).^c Current state of the object. Does not refer to its corrosion.^d The types have been defined by Philip (1989).^e Complete: the object is not missing any part.^f Incomplete: the object is missing some parts but most of its dimensions are still available.^g Fragment: Only a part of the object remains.^h N.A.: not available.**Table 3**

State of preservation, dimensions, typology and percentage of maximum thickness reduction of socketed spearheads.

Weapons	Inventory number ^a	Publication number ^b	Context	Current state ^c	Weight (g)	Preserved length (nm)	Max blade thickness (nm)	Thickness at lower zone (nm)	Thickness at central zone (nm)	Thickness at upper zone (nm)	Thickness reduction ⁱ	Type ^d
Large	9028	9669	Deposit λ	Fragment ^g	187	246	14	1.3	N.A. ^h	N.A.	N.A.	2
	10336	8441	Deposit γ	Fragment	85	199	11	0.4	N.A.	N.A.	N.A.	2
	11856	9523	Deposit ι	Incomplete ^f	230	404	12	1	0.3	N.A.	70%	2
	11914	8346	Deposit β	Incomplete	344	484	15	2	N.A.	0.5	N.A.	2
	27855	9626	Deposit λ	Fragment	187	260	11	1	N.A.	N.A.	N.A.	2
	27856	9667	Deposit λ	Fragment	137	296	9	1.5	0.6	N.A.	80%	2
	27884	9632	Deposit λ	Fragment	138	217	10	1.2	N.A.	N.A.	N.A.	2
Medium	10978	10834	Deposit χ	Fragment	69	276	8	N.A.	0.3	N.A.	80%	4
Small	10277	8298	Deposit β	Complete ^e	64	185	6	N.A.	N.A.	0.4	N.A.	6
	10280	8291	Deposit β	Incomplete	60	158	6	N.A.	N.A.	0.5	N.A.	9
	10322	8434	Deposit γ	Complete	80	155	6	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	?
	10325	8432	Deposit γ	Incomplete	52	164	7	N.A.	N.A.	0.5	N.A.	?
	10810	4059	mur Lv XI/XX	Fragment	34	132	6	0.3	0.2	N.A.	80%	?
	10976	10839	Deposit χ	Incomplete	66	160	9	N.A.	0.3	N.A.	N.A.	8
	10977	10836	Deposit χ	Incomplete	65	188	10	N.A.	N.A.	0.2	N.A.	8
	10982	10846	Deposit χ	Incomplete	49	184	9	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	8
	10997	10845	Deposit χ	Incomplete	91	173	9	N.A.	0.4	N.A.	N.A.	8
11200	10105	Deposit ζ	Complete	54	197	8	N.A.	N.A.	0.3	70%	9	

^a Inventory number for archaeological objects situated in the National Museum of Beirut (Lebanon).^b Inventory number given and published by the site archaeologists (Dunand, 1954, 1939; Montet, 1928).^c Current state of the object. Does not refer to its corrosion.^d The types have been defined by Philip (1989).^e Complete: the object is not missing any part.^f Incomplete: the object is missing some parts but most of its dimensions are still available.^g Fragment: only a part of the object remains.^h N.A.: not available.ⁱ Estimation, from the elongation factor of the copper sulfide inclusions of the maximum thickness reduction in the "central" and "upper zone" given in percentage.

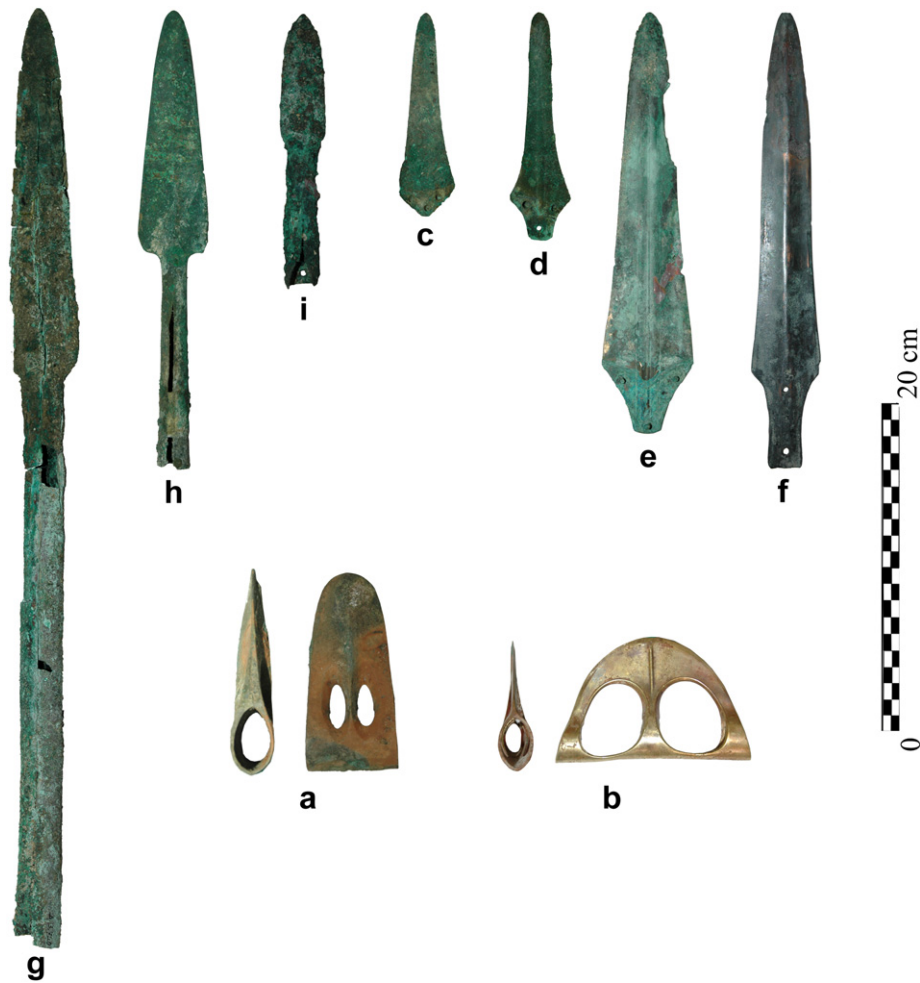


Fig. 1. The investigated weapon types: (a) duckbill axe; (b) D-shape axe; (c, d) daggers; (e) double-ribbed dagger; (f) riveted spearhead; (g) long socketed spearhead; (h) medium socketed spearhead; and (i) small socketed spearhead (Photos are courtesy of Guillaume Gernez).

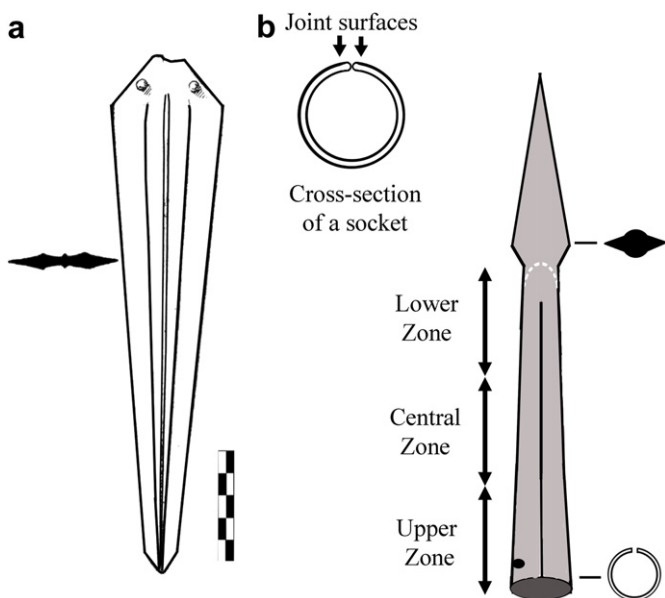


Fig. 2. (a) Drawing of a double-ribbed dagger showing some details of the blade's cross-section (Dunand, 1958: 739; fig. 872); and (b) scheme showing the designation of the different parts of the socketed spearhead.

exclusively sound metal was used for analysis. Most of the measurement areas were larger than $2500 \mu\text{m}^2$. An average of 3 analyses was carried out on each sample. This number could vary between 2 and 22 depending on the conditions mentioned above (see Tables 4–6).

4. Results

4.1. Fenestrated axes

The duckbill axes and the D-shape axes (Appendix A) generally display an as-cast structure (Fig. 3A) characterised by its dendrites and pores. However, most of the cutting edge area presents evidence of cold deformation manifested by distorted dendrites, deformation twins and elongated inclusions. Furthermore, the point of the blade reveals elongated polygonal grains associated with deformation twins which underline the application of a different metallurgical treatment.

The copper base alloys used to make the D-shape axes consist mainly of binary alloys such as bronze or arsenical copper (Table 4). The duckbill axes are made of binary alloys (CuSn), ternary alloys (CuSnPb and CuAsPb) and quaternary alloys (CuSnAsPb). The latter, used in axes 6281 and 6272, contain an almost equivalent amount of arsenic and tin. Lead was detected in six duckbill axes with amounts varying between 3 wt% and 23 wt% (Table 4).

Table 4
Elementary composition of fenestrated axes and daggers.

Weapons	Inventory number ^a	Publication number ^b	nb. of samples ^c	nb. of analyses	Cu	Sn	As	Pb	Sb	Fe	S	Ni	Ag	Mg
Duckbill axes	6270	10645	1	3	83.5	7.8	1.2	6.8	n.d. ^d	n.d.	tr ^d	tr	n.d.	n.d.
	6271	10646	3	22	92.8	4.0	n.d.	2.8	n.d.	n.d.	n.d.	tr	n.d.	n.d.
	6272	10646	1	2	72.8	3.4	3.5	20.3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	6273	10646	2	9	89.2	8.0	1.2	0.7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.1	n.d.
	6281	7903	3	15	81.8	2.8	3.0	12.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	8349	940	1	2	71.4	n.d.	4.8	23.2	n.d.	0.6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	8350	14470	1	8	cr ^d	cr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	9076	941	1	7	cr	cr	n.d.	cr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	10794		3	9	90.0	10.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	D-Shape axes	6320	9997	2	10	93.1	6.4	tr	n.d.	n.d.	n.d.	tr	n.d.	n.d.
10988		10826	2	11	91.5	8.3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	tr	n.d.	n.d.	n.d.
11655		8818	1	2	97.0	n.d.	3.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
11656		8819	1	2	95.4	n.d.	4.6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
11658		8817	1	2	97.0	n.d.	3.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
11708		10151	1	5	87.3	12.2	0.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Daggers general	10293	8330	1	6	92.1	n.d.	6.9	n.d.	n.d.	tr	0.6	n.d.	n.d.	n.d.
	11661	10142	1	3	93.4	n.d.	6.0	tr	n.d.	tr	tr	n.d.	n.d.	n.d.
	11671	10122	1	4	95.8	n.d.	2.6	tr	n.d.	0.9	tr	tr	n.d.	n.d.
	11686	10134	1	2	88.5	10.5	1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	11697	10132	1	3	93.0	3.2	3.4	n.d.	n.d.	tr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	11854	9535	1	2	97.1	n.d.	1.3	n.d.	n.d.	1	0.6	n.d.	n.d.	n.d.
	11930	8344	3	9	95.2	2.5	2	0.6	n.d.	n.d.	0.5	n.d.	n.d.	n.d.
	27857	8365	1	2	89.3	9.9	tr	tr	n.d.	tr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Double-ribbed daggers	9021	9665	1	3	85.6	14.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
10309		8342	2	4	85.5	10.0	0.5	3.8	n.d.	tr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
27871		9654	1	6	84.8	15.2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
27883		9658	1	5	84.5	15.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

^a Inventory number for archaeological objects situated in the National Museum of Beirut (Lebanon).^b Inventory number given and published by the site archaeologists (Dunand, 1939, 1954; Montet, 1928).^c Represent the total number of samples used for EDS analyses for each object.^d n.d.: not detected; tr: element present between 0.1 wt% and 0.5 wt%; and cr: major element detected in a corroded metallic matrix.**Table 5**
Elementary composition of riveted spearheads and socketed spearheads.

Weapons	Inventory number ^a	Publication number ^b	nb. of samples ^c	nb. of analyses	Cu	Sn	As	Pb	Sb	Fe	S	Ni	Ag	Mg	
Riveted	9031	8374	1	2	95.0	n.d.	4.3	n.d. ^d	n.d.	tr ^d	tr	n.d.	n.d.	n.d.	
	9046	9616	1	4	83.9	15.4	n.d.	0.7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
	9050	8361	1	2	97.0	tr	2.6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
	9051	8382	1	3	96.0	tr	2.9	n.d.	n.d.	0.5	tr	n.d.	n.d.	n.d.	
	10334	8418	1	3	97.8	n.d.	1.5	n.d.	n.d.	tr	tr	n.d.	n.d.	n.d.	
	11102	10703	1	3	96.9	0.5	2.0	n.d.	tr	tr	tr	n.d.	n.d.	n.d.	
	11109	10704	1	3	97.6	n.d.	1.5	0.6	n.d.	0.6	tr	n.d.	n.d.	n.d.	
	11110	10698	1	2	96.7	n.d.	2.2	0.5	n.d.	0.7	tr	n.d.	n.d.	n.d.	
	12320	8842	1	4	87.3	6.6	0.5	4.8	n.d.	tr	tr	n.d.	n.d.	n.d.	
	12329	8837	1	3	96.3	n.d.	3.1	n.d.	n.d.	tr	tr	n.d.	n.d.	n.d.	
	12332	8839	2	4	86.2	11.6	n.d.	2.2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
	Large	9028	9669	2	5	84.7	15.3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		10336	8441	1	3	85.4	12.2	0.5	1.2	n.d.	n.d.	n.d.	tr	tr	n.d.
		11856	9523	3	6	86.1	13.9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
11914		8346	1	5	86.0	14.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
27855		9626	1	4	87.9	12.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
27856		9667	2	7	87.5	12.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
27884		9632	2	4	84.9	15.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
Medium	10978	10834	2	5	91.6	7.7	tr	n.d.	n.d.	tr	tr	n.d.	tr	n.d.	
Small	10277	8298	1	3	90.1	n.d.	9.9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
	10280	8291	2	6	95.0	n.d.	3.3	n.d.	0.9	0.6	tr	n.d.	n.d.	n.d.	
	10322	8434	1	2	95.0	n.d.	4.5	n.d.	n.d.	n.d.	0.5	n.d.	n.d.	n.d.	
	10325	8432	1	2	85.4	12.9	tr	0.8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	tr	n.d.	
	10810	4059	3	16	96.4	0.7	2.4	n.d.	n.d.	0.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
	10976	10839	2	5	92.6	7.2	n.d.	tr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
	10977	10836	3	11	92.4	6.9	n.d.	n.d.	n.d.	tr	0.5	n.d.	n.d.	n.d.	
	10982	10846	1	7	cr ^d	cr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
	10997	10845	1	2	90.1	8.6	0.7	n.d.	n.d.	tr	tr	n.d.	n.d.	n.d.	
	11200	10105	1	2	97.6	n.d.	2.1	n.d.	n.d.	tr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	

^a Inventory number for archaeological objects situated in the National Museum of Beirut (Lebanon).^b Inventory number given and published by the site archaeologists (Dunand, 1939, 1954; Montet, 1928).^c Represent the total number of samples used for EDS analyses for each object.^d n.d.: not detected; tr: element present between 0.1 wt% and 0.5 wt%; and cr: major element detected in a corroded metallic matrix.

Table 6
Elementary composition of collars, brazes and rivets.

Features	Inventory number ^a	Publication number ^b	nb of samples ^c	nb of analyses	Cu	Sn	As	Pb	Sb	Fe	S	Ni	Ag	Mg
Collar	10976	10839	1	4	90.3	7.9	n.d. ^d	n.d.	n.d.	tr ^d	n.d.	n.d.	1.4	n.d.
	10978	10834	1	4	90.8	8.1	tr	n.d.	n.d.	tr	tr	n.d.	tr	n.d.
	10997(1)	10845	1	3	90.5	7.8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	tr	n.d.	0.5	n.d.
	10997(2)	10845	1	4	91.2	7.3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	tr	n.d.	1.2	n.d.
Braze	10976	10839	2	8	36.9	0.8	n.d.	0.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	61.5	0.3
	10978	10834	1	6	36.0	3.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	tr	n.d.	59.4	tr
	10997	10845	2	3	38.7	2.6	n.d.	0.6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	57.7	0.3
Rivets	9021	9665	1	3	82.6	17.0	tr	1.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	27857	8365	1	3	95.6	n.d.	3.4	n.d.	n.d.	0.7	tr	n.d.	n.d.	n.d.
	11661	10142	1	3	96.7	n.d.	2.5	tr	n.d.	0.5	tr	n.d.	n.d.	n.d.
	11671	10122	1	3	97.2	tr	2.0	n.d.	n.d.	0.6	tr	n.d.	n.d.	n.d.
	11697	10132	1	2	96.4	n.d.	2.3	n.d.	n.d.	1	tr	n.d.	n.d.	n.d.

^a Inventory number for archaeological objects situated in the National Museum of Beirut (Lebanon).

^b Inventory number given and published by the site archaeologists (Dunand, 1939, 1954; Montet, 1928).

^c Represent the total number of samples used for EDS analyses for each object.

^d n.d.: not detected; tr: element present between 0.1 wt% and 0.5 wt%; and cr: major element detected in a corroded metallic matrix.

4.2. Daggers and riveted spearheads

These two types of weapons are presented together as they show the same grain structures. The blade rib and the hilt display an annealed structure characterised by equiaxed polygonal grains and annealing twins. The structure of the blade's cutting edge exhibits distorted and elongated polygonal grains associated with deformation twins which resulted from deforming an annealed structure. The metallographic observation of the double-ribbed

dagger 10309 revealed that the annealed ribs contain elongated pores. The presence of these pores, which generally occur in as-cast structures, demonstrates that this part of the dagger was not completely homogenised by the cold deformation process. Three of the double-ribbed daggers and two riveted spearheads are made of bronze containing 14–15 wt% tin. The double-ribbed dagger 10309 and riveted spearhead 12320 are made of leaded bronze. All these weapons display cracks (Fig. 3B). Daggers 27857 and 11686 are made of bronze with around 10 Wt% tin. In daggers 11697 and

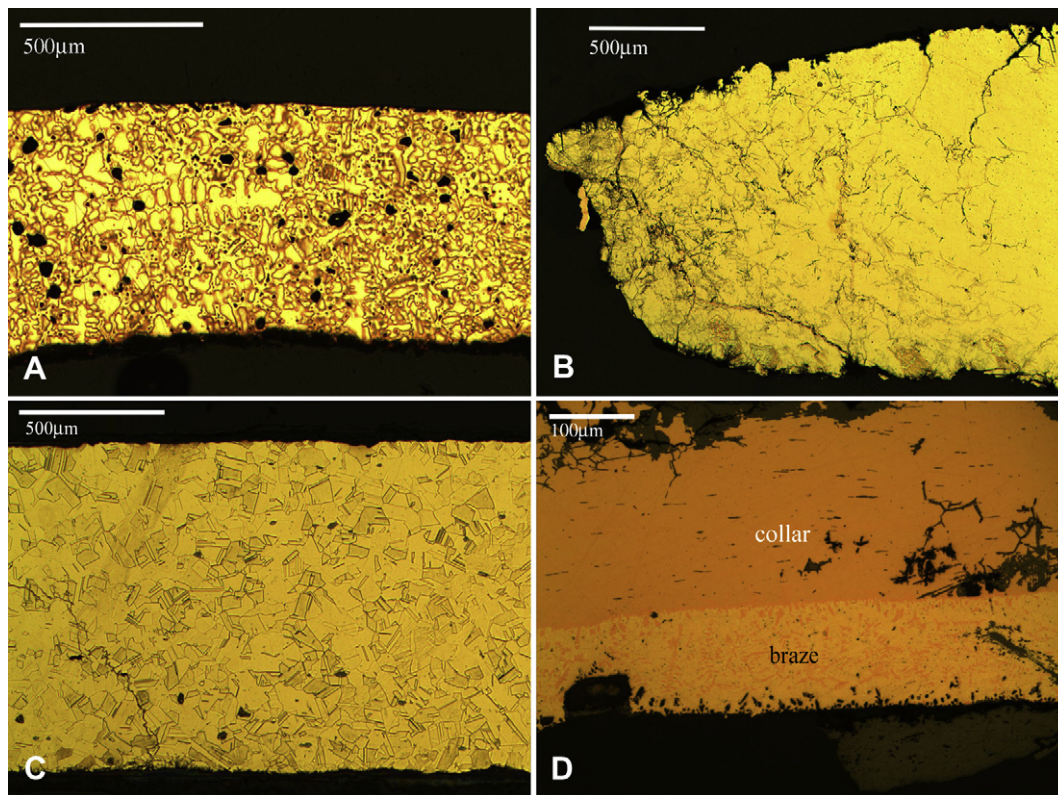


Fig. 3. Cross-sections displaying grain structures (reflected light optical microscopy): (A) as-cast structure revealed in the collar of D-shape axe 11656. It shows pores and minor segregations around the dendrites (etching FeCl_3); (B) cracks in the hilt of a double-ribbed dagger; (C) annealed structure with equiaxed polygonal grains revealed in the “lower zone” of large socketed spearhead 27884 (etching FeCl_3); and (D) collar of spearhead 10978 with layer of braze.

11930, a ternary copper base alloy containing almost equivalent amount of tin and arsenic (both between 2 wt% and 4 wt%) was used. The remaining 12 daggers and spearheads are made of arsenical copper with arsenic amounts varying between 1 wt% and 7 wt% (Tables 4 and 5).

4.3. Socketed spearheads

The large, medium and small socketed spearheads present the same features. The microstructure of some of these weapons has been thoroughly described in El Morr and Pernot (2010). Therefore only the general aspects of the microstructure will be described in this paper. The cutting edge was hardened. It exhibits elongated polygonal grains associated with mechanical twins as well as elongated copper sulfide inclusions.

The socket part (Fig. 3C) displays a homogenised annealed structure characterised by equiaxed polygonal grains and annealing twins. The grain size decreases gradually from the “lower zone” to the “upper zone” of the socket. In the same way, the elongation of the copper sulfide inclusions increases from the “lower zone”, where they are rounded or oval, to the “upper zone” where they become elongated and in some cases fractured. This is in agreement with our macroscopic recordings as the “lower zone” is generally three to four times thicker than the “upper zone” (Table 3). These observations reveal the manner in which the deformation process was carried out on the socket part. It shows that the amount of cold working increases from the “lower zone” to the “upper zone”. The direction in which the cold deformation was applied is revealed by the orientation of the inclusions’ elongation. It is mostly oblique to the long axis of the spearhead. However the “joint surfaces” present an exception as the main axis of the inclusions is parallel to the long axis of the weapon. The whole cold deformation process of shaping the socket is detailed in El Morr and Pernot (2010). It consists of cold hammering the socket obliquely around a hard wooden pole in a process which would have been interrupted by several annealing treatments. This process is performed to elongate the socket and to join the two sides of the socket’s gap (Appendix B). Moreover, the elongation factor of the copper sulfide inclusions allows estimating the rough amount of thickness reduction which resulted from the deformation process of the socket. Generally, it is around 70% or 80% in the “central” and “upper zone” (Table 3).

The metallographic observation revealed that the sockets of spearheads 10976, 10977, 10978, 10982 and 10997 are covered by one or several collars. In the well-preserved samples of spearhead 10976 (Fig. 3D), 10978 and 10997 a silver–copper braze (60 wt% to 62 wt% Ag) was used to fix the collars to the socket. In spearheads 10977 and 10982 the braze is completely corroded. In addition to copper and silver, the brazing alloys contains between 0.8 wt% and 3.4 wt% of tin (Table 6). The collar(s) and the socket have almost the same alloy composition (Tables 5 and 6) and grain structure. The braze displays dendrites rich in copper (around 79 wt% Cu) surrounded by a lamellar eutectic structure rich in silver (around 28 wt% Cu). It is applied between the collars and the socket’s “joint surfaces” which are generally positioned one on top of the other. The braze width varies between 3 and 5 mm and its thickness between 50 and 150 μm . The EDS analyses show that the brazing alloy diffused in the collars; around 1 wt% of silver can be detected up to a depth of 50 μm from the contact surface of the collar.

Most of the remaining small socketed spearheads are made of arsenical copper. The large socketed spearheads are all made of bronze with amounts of tin ranging from 12 wt% to 15 wt% (Table 5). All the large socketed spearheads display cracks and occasionally contain $\alpha + \delta$ phase inclusions mostly concentrated at the “lower zone” of the socket.

5. Discussion

5.1. Casting

The archaeological evidence from Byblos shows that the fenestrated axes were cast in multiple-piece moulds made of soft stones such as steatite (Fig. 4a) and that daggers and riveted spearheads were cast in two-piece moulds (Fig. 4c). The sprue in the latter type of mould is positioned on top of the hilt. Lost wax moulding could have been used to make these weapons. However, evidence confirming this possibility is yet to be found.

There are no satisfying descriptions or illustrations, to our knowledge, of finds that could be identified as socketed spearhead moulds except for one rough drawing (Fig. 4b) from Dunand (1939: 425, fig. 312). The author identifies it as an oblong bloc of steatite of 11 cm in length. The date of this item remains unidentified. Therefore, determining the spearhead’s rough casting shape is crucial to recognising the corresponding mould. The rough casting

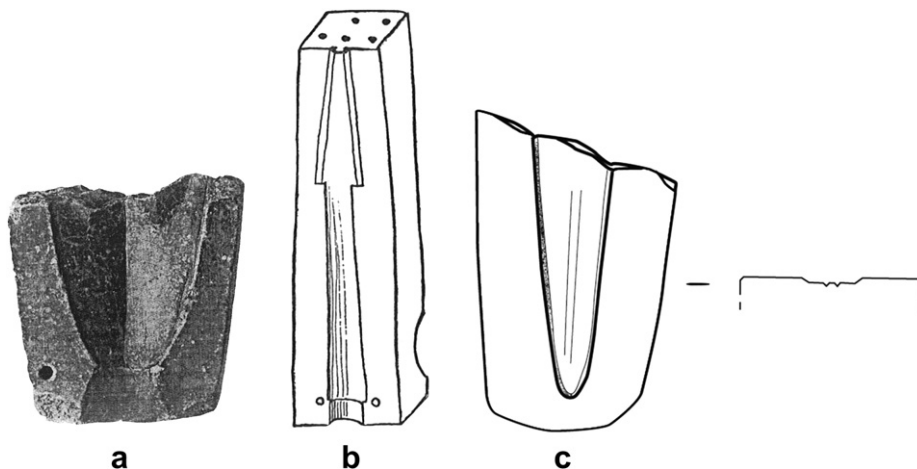


Fig. 4. Middle Bronze Age weapon moulds: (a) duckbill axe mould from Byblos showing the sprue and the blade pattern cavity (Dunand, 1939, n° 3069, p. 198, Atlas 1937, Pl. CVIII); (b) mould of a small socketed spearhead (Dunand, 1939, n° 6558, p.425, fig. 312); and (c) mould showing the blade pattern cavity of possibly a double-ribbed dagger (Dunand, 1954: 224, illustration by Gernez, 2007, ill. 180).

shape has been previously identified (El Morr and Pernot, 2010) by investigating the amount and the direction of the cold deformation work applied on the socket part (Appendix B). It has been concluded that the socket's rough casting had a truncated hollow cone form. At this stage of production, the gap separating the "joint surfaces" was V-shaped (Fig. 5b). Obviously, the point of the V is situated at the "lower zone" of the socket. To produce this complex shape of rough casting, the use of a multiple-piece mould or lost wax moulding is required. It is most likely that several similarities existed between the socketed spearhead and the fenestrated axe's multiple-piece mould: The mould is composed of two outer pieces that create the external shape of the weapon and a core that produces the interior shape of the collar or the socket (Fig. 5a). The mould's narrowest cavity (collar or socket pattern cavity), which also contains the smallest amount of liquid metal, is positioned at the lowest part of the mould. On top of it are, respectively, the blade pattern cavity and the sprue. As the main bulk of liquid metal is located in the upper part of the mould, the solidification of liquid metal is initiated at the lower narrow parts and the pattern cavities' surface. This process is concluded at the centre of the blade, i.e. the midrib. Consequently the gas formed inside the molten metal during cooling is evacuated from the collar or the socket's pattern cavities through the blade pattern cavity and the sprue. This design considerably reduces the risk of forming casting defects in most of the sensitive areas of the weapon such as the hafting parts.

Due to this particular mould design, the liquid metal in the narrow pattern cavities is under constant pressure from the mass of liquid gathered in the blade pattern cavity and the sprue. This disposition is essential as surface tension could be a hindrance to the successful casting in non-wetted moulds presenting pattern

cavities narrower than 1 or 2 mm (Campbell, 2004: 75–76). The particular volume distribution of the mould combined with an adapted vent should constitute some of the determining factors in better filling the narrow cavities of the collar or the socket. The extent of the surface tension's influence is made on the assumption that the mould surface is not wetted by the liquid metal. Wettability depends on many variables (Berg, 1993: 484) some of which the craftsman might have been able to control. For example, the use of a fired clay core mould part with rough organic temper increases the porosity, and therefore the specific surface area, which could improve the wettability. Further improvement might have been possible by choosing an adequate alloy recipe. In this regard, we find it useful to mention that during her casting experiments using triple spiral steel moulds, Amendola (2010: 119) remarked that among bronze alloys only leaded bronze alloys display a high capillarity that allowed the liquid metal to infiltrate between the joints of the mould. This said, the large amount of variables involved in the casting process do not allow us, for the time being, to make a precise assessment on the influence of surface tension on casting while using these Middle Bronze Age moulds. Nevertheless, we should mention that, according to information communicated personally by modern craftsmen at the Coubertin Foundry in France, casting in sections thinner than 1 mm remains a difficult and risky task even today.

5.2. Cold working and annealing treatments

In all the weapon types studied in the present paper, the cutting edge was hardened by cold working and the other parts were either softened by annealing such as in the dagger and spearhead's case or

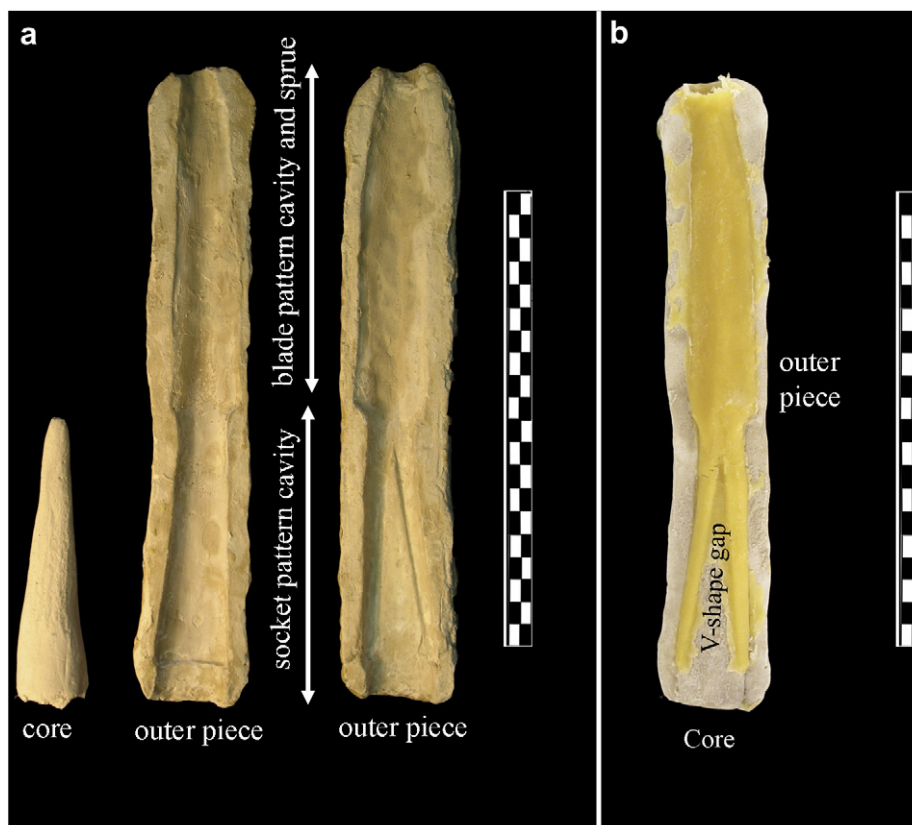


Fig. 5. Multiple-piece experimental mould of clay used for casting wax models of socketed spearhead; (a) the mould is composed of two outer pieces that create the external shape and a core that creates the socket's interior shape; and (b) wax rough casting of a socketed spearhead showing the V-shape gap.

left as cast such as in the fenestrated axe's case. The hardening of the cutting edge is most likely the consequence of sharpening.

It is worth remembering that casting generally produces a dendritic structure with variable composition and pores. Applying several cold deformation and annealing cycles eventually leads to the homogenisation of the grain structure and the elimination of pores. Another process of homogenising the chemical composition of the metal is by applying a heat treatment prior to the deformation process. However, as this process requires several hours of heating at a temperature around 974 K, it is quite doubtful that it was applied in the period concerned (Andrieu et al., 2000).

Cold deformation hardens copper base alloys and might lead to cracking if it is excessively applied. Therefore, important amounts of cold work are usually interrupted by one or several annealing treatments. If correctly applied, annealing treatment recrystallises the hard distorted grain structure which leads to the formation of equiaxed polygonal grains and annealing twins (Cahn, 1983: 1611). As a consequence this treatment softens the metal allowing the craftsman to continue cold working with reduced risk of cracking. The work of Pernot and Montheillet (1994), Pernot (2000) and Andrieu et al. (2000) on the thermo-mechanical behaviour of experimental bronze samples containing different types and amount of inclusions have shown that for an annealing temperature of 974 K, a deformed bronze containing 9 wt% tin requires several minutes to recrystallise.

As mentioned in Section 4.1 the fenestrated axe's blade point displays elongated polygonal grains and deformation twins. This type of structure has also been recorded by Branigan et al. (1976) and Shalev (2009). It resulted from cutting the sprue and reshaping the point of the blade in a process which probably required one or several sets of cold deformation and annealing. It was then followed by sharpening the cutting edge and the point of the blade creating the distorted grain structure observed in these areas. In regard to the evidence found here and to the mould design, the practice of eliminating the sprue is an obligatory stage in the production process of all types of fenestrated axes.

The fact that both fenestrated axe types have sharpened cutting edges while most of their other parts were maintained as-cast, argues against the hypothesis which considers that duckbill axes D-shape axes have two different functions (Caspi et al., 2009): The former were made to be used in combat while the latter were non-functional weapons exclusively used as a status symbol. The similarity in grain structures lead us to believe, at least in the case of Byblos, that both axe types could have been used as functional weapons even though the existence of precious metal examples of D-shape axes might indicate that they were perceived as weapons of higher "status" than the duckbill axes.

The process of eliminating the sprue, reshaping and piercing of the rivet holes are also responsible for the complete homogenisation of the dagger's hilt as they involve cold working and annealing cycles. Alternatively, as grooves and ribs were conceived in the mould's pattern, they probably did not require an important reshaping by deformation and thus parts such as the centre of the double-ribbed daggers were not completely homogenised by the cold deformation process.

The cracks observed in the double-ribbed daggers and the long socketed spearheads are probably related to cold working copper base alloys containing high amounts of tin or lead. The latter metal is immiscible in copper base alloys. It is present in the crystalline structure along the grain boundaries under the form of nodules that regain their globular shape during every annealing treatment (Pernot, 2000). Therefore, under mechanical stress, they constitute defects that could trigger the formation of cracks. This particularity makes leaded copper alloys unsuitable for wrought working. Bronze alloys containing between 12 wt% and 15 wt% tin are

generally harder and more brittle than alloys containing less tin (Lechtman, 1996; Piccardo et al., 2004). Furthermore, such amounts of tin implicate the formation of large quantity of $\alpha + \delta$ phase inclusions during solidification as a result of the eutectoid reaction occurring at 793 K. These inclusions are brittle and, as same as the lead nodules, have a different hardness than the α -bronze matrix. Thus they represent potential cracking sites. $\alpha + \delta$ phase inclusions are usually eliminated as the metal is homogenised by a preliminary heating or by deformation and annealing (Andrieu et al., 2000). The observation of these inclusions in the almost homogenised socket of the large spearheads probably indicates their presence in important quantities at the rough casting stage. Furthermore it shows that probably no homogenising heating treatment was applied before the deformation process. Therefore, cold working could have been a relatively delicate process as the risk of important cracking is high. However, this did not prevent craftsmen from reducing the thickness of the socket by 80% probably by carefully applying small amounts of deformation frequently interrupted by annealing.

Finally it is worth mentioning that cold working and annealing treatments have been practised in the southern Levant, Egypt and Anatolia from at least the fourth millennium B.C. (Scheel, 1989: 30, Moorey, 1994: 269, Namdar et al. 2004, Shalev, 1995) therefore it is not very surprising to see that the craftsmen had already fully mastered these techniques by the early second millennium B.C.

5.3. Brazing

Near Eastern archaeological evidence suggests that brazing in Mesopotamia (Maryon, 1936) and Egypt (Lucas, 1948: 248) could date back to the 26th century B.C. In the Levant, and to our knowledge, this is the first time brazing has been recorded for such early periods. This however does not necessarily imply that brazing and soldering practices in this region were first used in the Middle Bronze Age.

Maryon (1912: 6) classifies silver–copper alloys as hard solders, which is a category that was used by goldsmiths, silversmiths and coppersmiths. According to the same author, "joints made of hard (solder) are considerably stronger than those made by soft (solder)". Even today, silver and copper are still employed in the fluxless joining of copper base alloys in vacuum (Jackobson and Humpston, 2005: 51). It is not clear if the presence of tin in some of the brazing alloy is due to a diffusion process from the collar and the socket into the brazing alloy or if it was originally included in the recipe. The employed silver–copper alloy will completely melt (liquidus point) at a temperature around 1103 K (Subramanian and Perepezko, 1993). The bronze used to make the five spearheads and their collars starts melting (solidus point) at around 1173 K (Saunders and Miodownik, 1990). Therefore it is quite possible that the brazing was made by heating silver–copper alloy stripes or wires positioned between the joint surfaces of the socket and the collars. However, this remains a delicate process that requires rigorous heat control to prevent the brazed parts from being melted. It should be noted that temperature could be controlled by highly skilled craftsmen through the observation of the heated metal's colour (Fluzin, 1983).

These weapons are part of a morphologically coherent group of eight spearheads discovered in deposit "χ" (Dunand, 1954). The observation of the socket cross-section revealed that it could be as thin as 170 μm . Therefore, long collars were applied to consolidate the weapon by increasing the thickness of the overall socket. Shorter collars must have had a different function as their joints are at the opposite side of the socket joint. They were probably applied to prevent the dislocation of the shaft from the socket during thrusting action. Spearheads from several sites in the Levant show

that the addition of a short collar or a ring on a socket was certainly a common practice in that period (Gernez, 2007: 348).

5.4. Alloy recipes

Most of the weapons made of arsenical copper contain arsenic amounts varying between 2 wt% and 5 wt% (Fig. 6). According to Lechtman (1996) these alloys are highly ductile. When they undergo cold working, their hardness becomes considerably higher than that of copper although it generally remains inferior to 8–12 wt% Sn bronze alloys. The use of copper alloys containing important amounts of arsenic shows continuity of late third millennium Levantine practices (Philip, 1991; Philip et al., 2003; Rosenfeld et al., 1997; Shalev, 2000). However, these results reveal a relative difference in alloying practices with some well documented contemporary sites such as Tell el-Dab'a (Philip, 2006: 211), where arsenical copper was apparently less used and the arsenic amount were generally lower than those of Byblos.

Out of the 24 weapons made of binary bronze, 14 contain between 12 wt% and 15 wt% of tin (Fig. 6). Compared to bronzes containing between 7 wt% and 12 wt% tin, these alloys are less fluid during casting (Amendola, 2010: 108), more brittle and harder to cold work due to the high amounts of $\alpha + \delta$ phase inclusions (see Section 5.2). Therefore good casting and mechanical properties were probably not the main criteria sought by using this recipe. The craftsmen could have used 15 wt% tin bronze for its hardness or low melting point (liquidus for Cu–15Sn is 1233 K and 1285 K for Cu–10Sn). However, cost and colour could have been an equally or even more important factor in determining the recipe: This bronze alloy (12–15 wt% Sn) was regularly used in large socketed spearheads and double-ribbed daggers. The large socketed spearheads are among the heaviest categories of copper base alloy weapons in Byblos (average weight of 350 g). As they contain one of the highest amounts of tin it could be assumed that these alloys have a particular colour and were probably the most expensive among bronzes. Considering the quantity and the quality of materials used in these spearheads, it can be argued that they represent one of the most expensive categories of copper base alloy weapons in Byblos. Adding high amount of tin to large socketed spearheads is also attested in one spearhead from Tell el-Dab'a (Philip, 2006: 211) and another from Arqa (unpublished data), both containing around 12 wt% tin. Comparing the double-

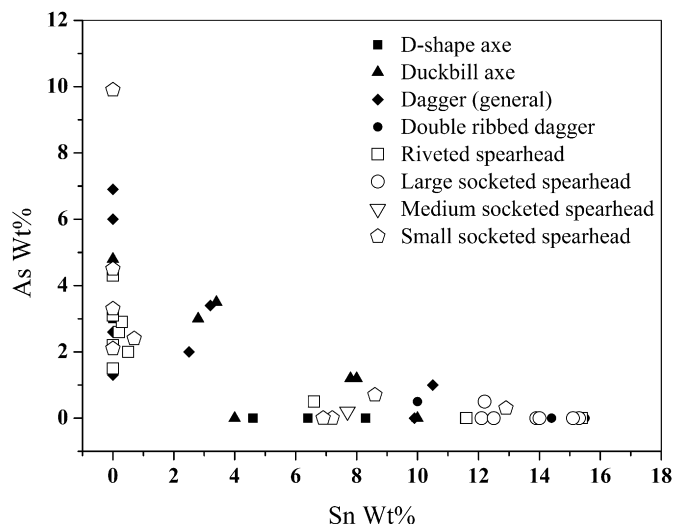


Fig. 6. Binary diagram plotting the As wt% vs. Sn wt% of all the analysed weapons.

ribbed daggers with the other type of daggers can lead to a similar interpretation; they present the most elaborate decoration, the heaviest category and the highest amount of tin. This correlation between “expensive” weapon type and relatively high-tin bronze recipe is clearly demonstrated on the As–Sn binary diagram (Fig. 6) where, apart from the double-ribbed daggers and large socketed spearheads, most of the weapon types could be made of arsenical copper or bronze. Previous studies such as Rosenfeld et al. (1997) related the use of bronze in the Middle Bronze Age with “artistic, sophisticated figurines”. Therefore, it is most likely that this recipe was used to denote the prestigious trait of these weapons by raising their cost and using a particular colour to indicate their value (Moorey, 1994: 253; Philip, 1991, Philip et al., 2003). According to Philip (2006: 214) the evidence from Tell el-Dab'a demonstrates that this particular practice of increasing the value of some types of weapons by using relatively expensive bronze alloys is characteristic of the early second millennium B.C.

The relative prestigious trait, the presence of cracks related to the deformation of a rather fragile bronze alloy and the absence of wear traces might indicate that the weapons containing such high amount of tin were never meant to be employed in actual combat. However, several other aspects could argue against this: the sharpening of the cutting edge and the multiple evidence of hafting (see Section 2) seem to indicate that those weapons were intended to be used.

Leaded alloys were regularly used in duckbill axes. These observations are confirmed by the results of Philip (1991), Shalev (2000, 2009) and Shenberg (1985). These brittle alloys are suitable for making fenestrated axes as most parts of these weapons were left as-cast. Up to 5 Wt%, and depending on the overheating temperature, lead increases the fluidity and the capillarity of a copper alloy (Amendola, 2010: 119). This could facilitate the filling of very thin mould cavities such as the collar pattern cavity. However the fact that leaded alloys were not used in three duckbill axes and all the D-shape axes, demonstrates that the use of leaded alloys is not crucial to the casting of fenestrated axes. It is most likely that lead was added to save other metals, i.e. tin and copper, as it appears to have been a cheap metal (Powell, 1996). This could explain the addition of high amounts of lead (up to 23 wt%) which are not necessarily beneficial to the casting properties of a copper base alloy.

The preferential use of expensive alloy recipes in large socketed spearheads and cheaper ones in fenestrated axes seems to contradict with earlier observations that spearheads have a lower “status” than axe heads (Shalev, 2009). It shows that, at least in Byblos, the notion of weapon “status” is a complicated issue that might be more related to the function of each weapon type, i.e. large socketed spearheads which are used as a thrusting weapon and small socketed spearheads that could be used as a javelin and therefore might be lost during combat, than it is to general categories such as spearheads and axes.

6. Conclusion

The systematic study of several items from the same weapon types allowed the reconstruction of several stages in the different *chaîne-opératoires* applied by the copper base alloy craftsmen at the beginning of the Middle Bronze Age. Furthermore, given the wide distribution of these weapon types, the data collected in this study provides an insight into the metallurgical know-how in a fairly large area that includes Syria, Palestine, Lebanon, the Nile Delta and Anatolia. The data showed that the Levant craftsmen possessed a thorough knowledge of copper base alloy metallurgy which could be manifested by operations such as cold working brittle copper base alloy and accurately designing and making

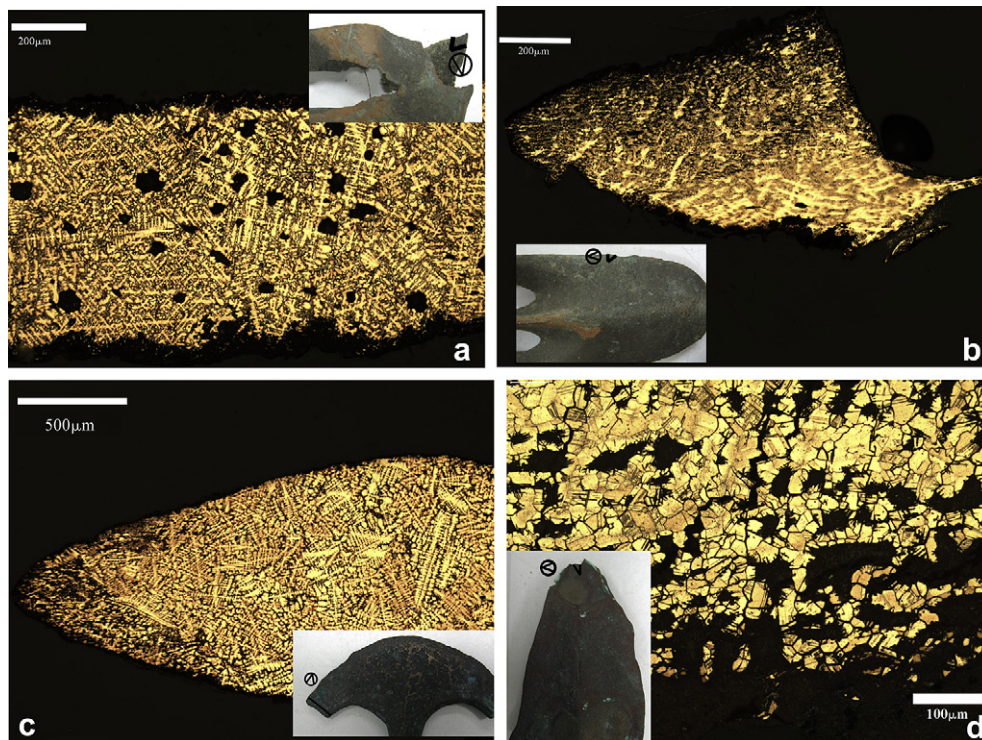
moulds that would reduce casting defects. This is not surprising given the fact that metallurgy has been practised in the Levant at least since the fifth millennium B.C. The precedence of brazing evidence in Mesopotamia and Egypt might suggest that this technique was imported into Byblos. This is highly plausible as Byblos had well developed trading activity since the first half of the third millennium B.C. especially with Egypt. However, further research into this practice in the Near East, especially on precious metal objects where brazing is probably more applied, is required before such conclusions can be made. The data collected on the alloy recipes used at Byblos generally conforms to the observations made on early Middle Bronze Age Levant: tin and arsenic were both widely used, although it seems like the arsenic is present in higher amounts in the Byblos weapons than in those of other contemporary sites. No technical preference, such as better thermo-mechanical behaviour, of bronze over arsenical copper was observed due to the fact that both alloys were employed in most types of weapons. However, a clear tendency of status demarcation is evident by the exclusive use of relatively high-tin bronzes in certain weapon types. This could have led to a form of recipe “standardization” such as in the case of large socketed spearheads. This reflects a Middle Bronze Age Levantine practice of using weapons and ornaments as a mean to express social status (Philip, 2006). Therefore, cultural tendencies such as the use of bronze to emphasise a certain value or status should be regarded as a possible factor, among several others, that contributed to the massive use of tin in the early second millennium B.C. The use of lead in cast objects such as the duckbill axes was also a widely used practice in the Middle Bronze Age.

However, the evidence from Byblos suggests that, while the Levant craftsmen were aware of its unwanted properties, lead was not necessarily used to improve casting. It seems more likely that the main objective behind its use was simply to economise other more expensive metals. Finally, comparison with north Levant was almost impossible due to an important lack of metallurgical data. Hence, studies concerning the metallurgy of this region, far more expanded in time and space, are required to improve our comprehension of the different practices and know-how, to define the general characteristics of this craft and to recognise the inter-regional differences in the Levant.

Acknowledgement

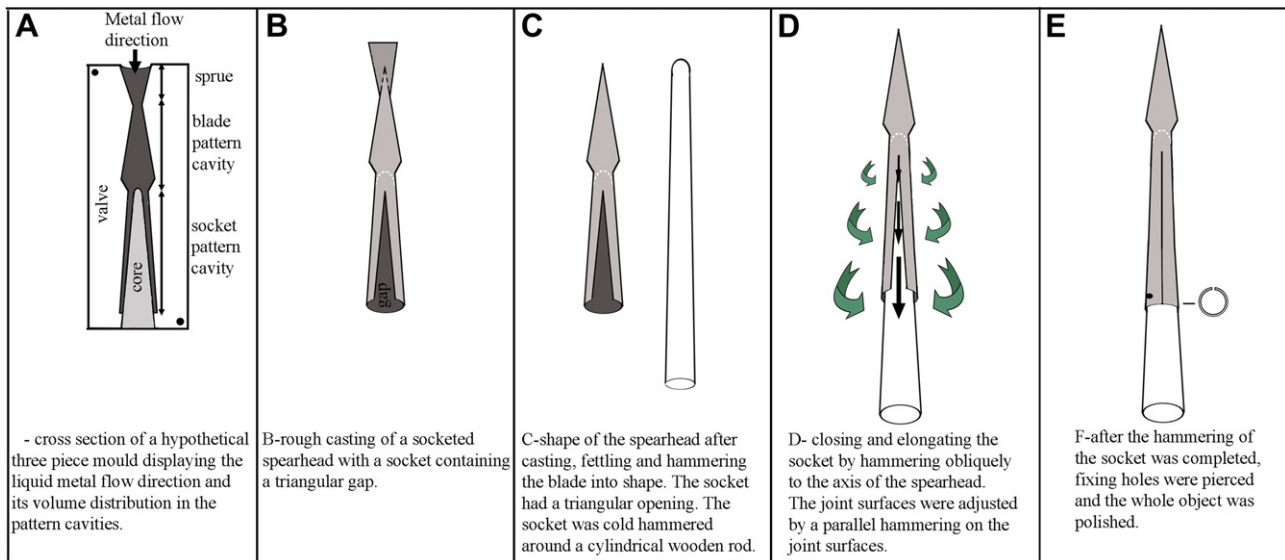
The results presented in this paper are part of the work of Ziad El Morr in the context of a CNRS-funded PhD under the supervision of Dr. Michel Pernot. The authors wish to thank the Directorate General of Antiquity in Lebanon, for allowing access to the archaeological materials. The authors also wish to thank Dr. Guillaume Gernez for providing photographs of some of the weapons and Professor Paolo Piccardo for authorising the use of some of his unpublished data.

Appendix A



Micrographs of different fenestrated axes samples etched with an FeCl_3 solution; (a) cross-section of duckbill axe 6273's collar showing an as-cast structure characterised by dendrites with minor segregation and pores; (b) cross-section of duckbill axe 6273's side cutting edge showing heavily distorted and elongated dendrites which resulted from sharpening by cold deformation; (c) cross-section of duckbill axe 6320's blade showing a cold worked cutting edge characterised by the distorted dendrites. The larger part of the blade was maintained as-cast; (d) cross-section of duckbill axe 10794's blade point displaying an annealed structure which shows evidence of a light cold work manifested by deformation twins.

Appendix B



Scheme reconstructing the different phases of the socketed spearheads' cold working process.

References

- Andrieu, S., Bayle, B., Pernot, P., Welter, J.-M., 2000. Influence de diverses inclusions sur le comportement d'un bronze CuSn9 sous différentes sollicitations mécaniques. La revue de Métallurgie-CIT/Science et Génie des Matériaux, 599–612. May 2000 Issue.
- Akkermans, P.M.M.G., Schwartz, G.M., 2003. The Archaeology of Syria: From Complex Hunter-gatherers to Early Urban Societies (ca. 16,000–300 BC). Cambridge University Press, Cambridge.
- Amendola, R., 2010. Influence of Alloying Elements on Properties of Casting Copper Base Alloys. Unpublished Ph.D. thesis, Università degli studi di Genova, Genova.
- Berg, J.C., 1993. Wettability. Marcel Dekker, New York.
- Branigan, K., McKerrel, H., Tylecote, R.F., 1976. An examination of some Palestinian bronzes. Journal of the Historical Metallurgy Society 10, 15–23.
- Cahn, R.W., 1983. Recovery and recrystallization. In: Cahn, R.W., Haasen, P. (Eds.), Physical Metallurgy, Part 2. North-Holland Physics Publishing, pp. 1595–1670.
- Campbell, J., 2004. Casting Practices: the 10 Rules of Castings. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Caspi, E.N., Etedgui, H., Rivin, O., Peilstöcker, M., Breitman, B., Hershko, I., Shilstein, S., Shalev, S., 2009. Preliminary neutron diffraction study of two fenestrated axes from the 'Enot Shuni' Bronze Age cemetery (Israel). Journal of Archaeological Science 36, 2835–2840.
- Dunand, M., 1939. Fouilles de Byblos 1926–1932, Tome I. Librairie orientaliste Paul Geuthner, Paris. Texte.
- Dunand, M., 1954. Fouilles de Byblos 1933–1938, Tome II. Librairie d'Amérique et d'Orient, Adrien Maisonneuve, Paris. Texte 1.
- Dunand, M., 1958. Fouilles de Byblos 1933–1938, Tome II. Librairie d'Amérique et d'Orient, Adrien Maisonneuve, Paris. Texte 2.
- El Morr, Z., Pernot, M., 2010. Fabrication techniques of the socketed spearheads from Middle Bronze age Byblos. Bulletin d'Archéologie et d'Architecture Libanaise 13, 215–228.
- Fluzin, P., 1983. Notions élémentaire de sidérurgie. In: Echard, N. (Ed.), Métallurgies Africaines, mémoire de la société des africanistes, vol. 9, pp. 13–44.
- Gernez, G., 2007. L'armement au Proche et Moyen-Orient des origines à 1750 av. J.-C., Unpublished Ph.D thesis, Université Paris I.
- Huot, J.-L., Thalmann, J.-P., Valbelle, D., 1990. Naissance des cités. Edition Nathan, Paris.
- Jackobson, D.M., Humpston, G., 2005. Principles of Brazing. ASM International, Ohio.
- Khalil, L., 1980. The Composition and Technology of Ancient Copper Alloy Artifacts from Jericho and related sites. Unpublished Ph.D. thesis, Institute of Archaeology, University College London, London.
- Lechtman, H., 1996. Arsenic Bronze: Dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas. Journal of Field Archaeology 23, 477–514.
- Lucas, A., 1948. Ancient Egyptian Materials and Industries, third ed. Edward Arnold & Co., London.
- Maryon, H., 1912. Metalwork and Enamelling. Chapman and Hall, London.
- Maryon, H., 1936. Soldering and welding in the Bronze and Early Iron Ages. Technical Studies 5, 75–108.
- Montet, P., 1928. Byblos et l'Égypte. Quatre campagnes de fouilles à Gebeil. 1921–1922–1923–1924. Librairie orientaliste Paul Geuthner, Paris. Texte.
- Moorey, P.R.S., 1994. Ancient Mesopotamian Materials and Industries. Eisenbrauns, Indiana.
- Moorey, P.R.S., Schweizer, F., 1972. Copper and copper alloys in ancient Iraq, Syria and Palestine: some new analyses. Archaeometry 14, 177–198.
- Namdar, D., Segal, I., Yuval, G., Shalev, S., 2004. Chalcolithic copper artefacts. In: Scheftelowitz, N., Oren, R. (Eds.), Giv'at Ha-Oranim, a Chalcolithic Site. Salvage Excavation Reports, 1, Tell Aviv, pp. 70–83.
- Pernot, M., 2000. Forming bronze by plastic deformation around the 1st millennium BC in Western Europe. In: Yue, S., Essadiqi, E. (Eds.), Thermomechanical Processing of Steel – J.J. Jonas Symposium, Metallurgical Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, pp. 615–626.
- Pernot, M., Montheillet, F., 1994. Archéométrie du formage: le martelage des alliages à base de cuivre à l'époque protohistorique, Premiers résultats. La Revue de Métallurgie – CIT/Science et Génie des Matériaux, 849–861. May 1994 Issue.
- Philip, G., 1989. Metal weapons of the Early and Middle Bronze Ages in Syria-Palestine. In: BAR International Series No. 526 Oxford.
- Philip, G., 1991. Tin, arsenic, lead: alloying practices in Syria-Palestine around 2000 BC. Levant 13, 93–104.
- Philip, G., 2006. Tell el-Dab'a XV. Metalwork and Metalworking Evidence of the Late Middle Kingdom and the Second Intermediate Period. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Vienna.
- Philip, G., Clogg, W., Dungworth, D., Stos, S., 2003. Copper metallurgy in the Jordan Valley from the Third to the First Millennia BC: chemical, metallographic and lead isotope analyses of artefacts from Pella. Levant 35, 71–100.
- Piccardo, P., Amendola, R., Natali, S., Ammannati, N., Martellucci, E., 2004. Some Aspect of Tin Amount Influence in α -bronzes. Internal Laboratory Report of the Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale, Unpublished result.
- Powell, M.A., 1996. Money in Mesopotamia. Journal of the Economic history of the Orient 39 (3), 224–242.
- Rosenfeld, A., Ilani, S., Dvorachek, M., 1997. Bronze alloys from Canaan during the Middle Bronze Age. Journal of Archaeological Science 24 (9), 857–864.
- Saghieh, M., 1983. Byblos in the Third Millennium B.C. Aris & Phillips LTD, Wilts.
- Saunders, N., Miodownik, A.P., 1990. The Cu–Sn (copper–tin) system. Journal of Phase Equilibria 11 (3), 278–287.
- Scheel, B., 1989. Egyptian Metalworking and Tools. Shire Publications LTD, Aylesbury.
- Scott, D.A., 1991. Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals. The J. Paul Getty Trust, Singapore.
- Shalev, S., 1995. Metals in ancient Israel: archaeological interpretation of chemical analysis. Isarel Journal of Chemistry 35, 109–116.
- Shalev, S., 2000. Archaeometallurgy. In: Kochavi, M., Beck, P., Yadin, E. (Eds.), Aphek-Antipatris I. Tel Aviv University, pp. 278–287.
- Shalev, S., 2009. Metals and society: Production and distribution of metal weapons in the Levant during the Middle Bronze Age II. In: Rosen, S., Roux, V. (Eds.), Techniques and People, Paris, pp. 69–80.
- Shenberg, C., 1985. Analysis of the weapons by X-ray fluorescence method. In: Yogev, O. (Ed.), Another Shaft Tomb South of Tel Rehov. Atiqot 17. Jerusalem Israel Antiquities Authority, p. 112.
- Subramanian, P.R., Perepezko, J.H., 1993. The Ag–Cu (silver–copper) system. Journal of Phase Equilibria 14 (1), 67–75. ASM International.

Fabrication techniques of the socketed spearheads from Middle Bronze age Byblos

ZIAD EL MORR AND MICHEL PERNOT

This paper presents the study of 17 socketed spearheads found in MB I contexts in Byblos. The study focuses mainly on the technological aspect of several types of spearheads. By using metallographic observation and chemical analyses the fabrication techniques of the concerned weapons were identified. Those results improve our understanding of the MB I copper alloy metallurgy in the Levant.

Introduction

At the end of the third millennium B.C. several new types of weapons, such as the fenestrated axe and the socketed spearhead, appeared in the Levant. The socketed spearhead quickly spread in this region and replaced the tanged spearhead (Gernez 2007). The earliest evidence of socket hafting is attested by harpoons and pikes from Ur dating back to 2500 B.C. According to the latest studies on this material, the spreading of this type of material was restrained to Ur and possibly Umm Al-Nar and Ras al-Jinz (Oman) where a socketed harpoon was found in each of those sites (Gernez 2007). The appearance and

success of this new hafting technique makes the study of the socketed spearheads an essential step in the process of understanding the evolution of metallurgy in MB I Levant. Therefore our objective in the present study is to attempt to reconstruct the different phases of the manufacturing process of these weapons in order to identify some of the knowhow of the MB I Levant craftsmen. Around 130 copper alloy socketed spearheads were found in Byblos. Among them 113 were found in the dépôts des offrandes excavated and published by Maurice Dunand. The excavator believed that those deposits were stored in a temple during what he called the «Amorrite period» which corresponds to the MB I

(Dunand 1954). The 17 spearheads discussed in this paper (**Fig. 1**) were found in deposits β , γ , ζ , ι , λ and χ of the dépôts des offrandes (Dunand 1954) as well as in the destruction of the walls from «Levéé XI» to «Levéé XX» (Dunand 1939).

The spearheads

The spearheads were classified into four groups (**Table 1**) based on morphometric and technological criteria. This classification corresponds to the typology established by both Gernez (2007) and Philip (1989):

- Large socketed spearheads; they correspond to Philip's «TYPE 2» and to Gernez's «L.5.A.a». Their total length exceeds 35 cm and the socket is 1.5 to 2 times longer than the blade. Their narrow blade has rounded shoulders and a large midrib decorated from each side by one or two longitudinal grooves. Eight spearheads belonging to this group were studied. They were found in deposits β , γ , ι , λ .

- Medium socketed spearheads; they correspond to Philip's «TYPE 4» and to Gernez's «L.5.B.b1». Their total length varies between 20 cm and 35 cm. The blade and the socket have approximately the same length. Their large triangular blade has straight shoulders and the midrib is decorated from each side by one or two longitudinal grooves. We have been able to study only one example, n°10834, found in deposit χ . All spearheads with this particular shape, but not necessarily with the same size, were exclusively found in deposit χ (Dunand 1950; Pl. LXXVIII). On most of the well preserved items from this group a metallic collar was found around the socket.

- Small socketed spearheads; they correspond to Philip's «TYPE 9» and to Gernez's «L.5.C.a» and «L.5.C.b1». The blade and the socket have approximately the same length. The total length of the spearhead does not exceed 20 cm. The blade has straight or convex cutting edge line. We have studied 5 of these weapons found in deposits β , ζ and from the destruction of the walls from «Levéé XI» to «Levéé XX» (Dunand 1939; 280-283). The spearheads from

deposit β does not have a midrib; the cross section of the blade presents either a lenticular or a lozenge shape.

- Folded socket spearheads; they correspond to Philip's «TYPE 10» but Gernez does not distinguish them from his «L.5.C» spearheads. This group is mainly different from the other groups in the way the socket part was made: a part of the spearhead was hammered into a thin sheet of metal and then folded around a handle. Four of those spearheads were included in our study. In Byblos all the spearheads belonging to this group were found in deposit β . Among this group, only spearhead n°8282 presents a socket that has twice the length of the blade. In the other examples the length of the blade and the socket are almost the same. The cutting edge line could be straight or convex and the cross section of the blade has a lenticular or lozenge shape.

group	publication number	context	sampling area
large socketed spearheads	8346	β	upper zone
	8441	γ	lower zone
	9523	ι	lower zone & upper zone
	9626	λ	lower zone
	9632	λ	lower zone
	9667	λ	central zone
	9669	λ	lower zone
medium socketed spearheads	10834	χ	central zone
small socketed spearheads	4059	walls from Levée XI to Levée XX	central zone, upper zone & blade's cutting edge
	8291	β	upper zone
	8298	β	upper zone
	8432	γ	upper zone
	10105	ζ	upper zone
folded socket spearhead	8279	β	upper zone
	8282	β	upper zone
	8288	β	upper zone
	8289	β	lower zone & upper zone

Table 1 - Archaeological context and sampling area of each spearhead. The reference of each object is the number given in Dunand's publications (1939; 1954).

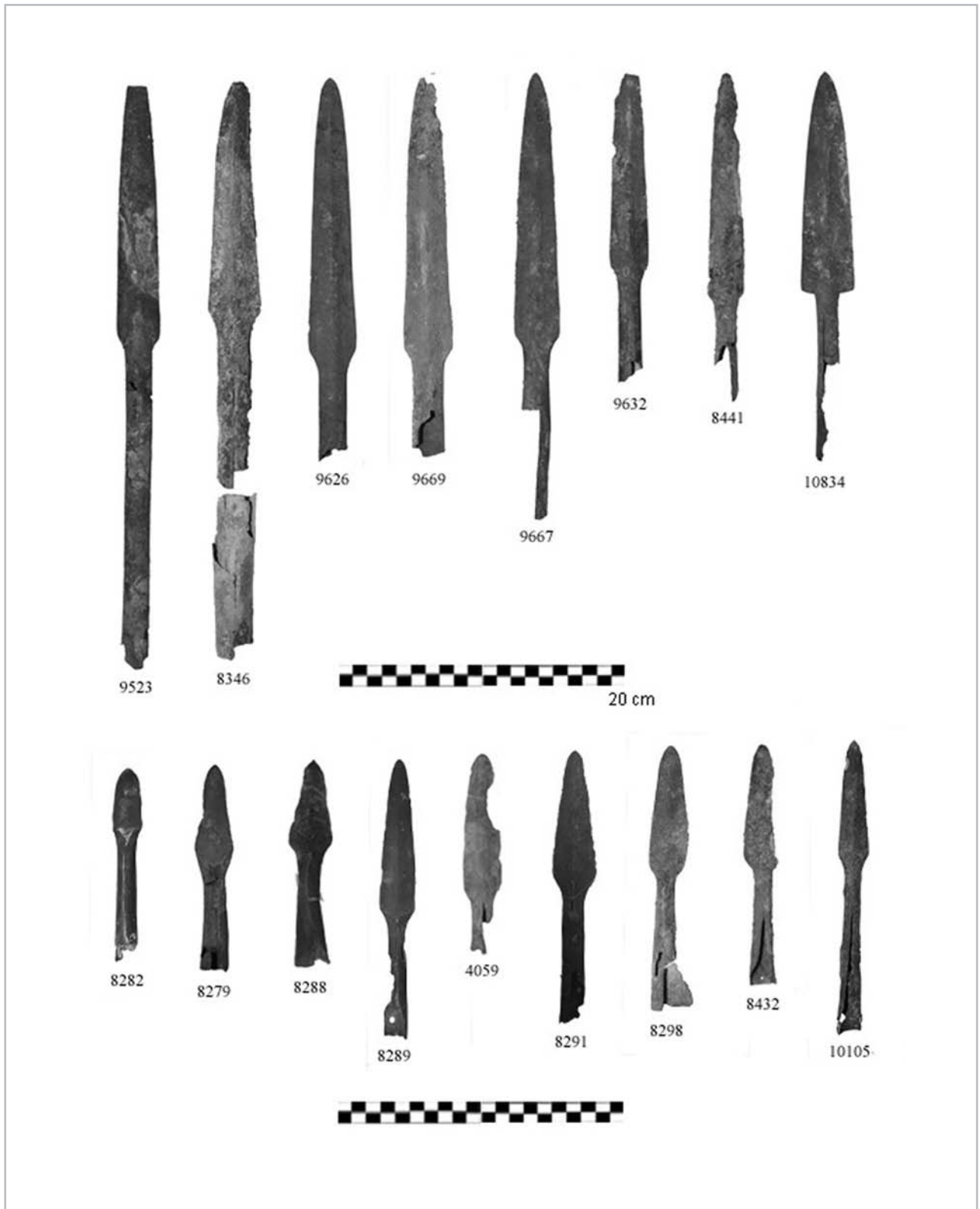
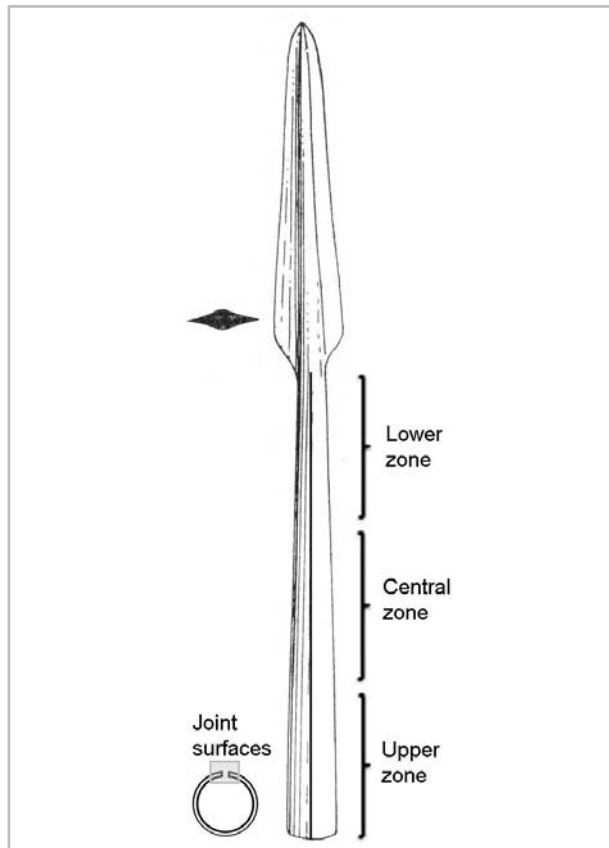


Fig. 1 -

In order to obtain a precise technological reading the socket was considered to be divided into three zones equal in length; the «lower zone» which is the part of the socket that is in direct connection with the blade, the «central zone» and the «upper zone» containing the extremity of the socket. The socket is separated in length by a thin opening. The areas of the socket forming the opening's sides are called «joint surfaces» (Pl. 1).

Methodology

In order to collect some information on the fabrication, the use, the deposition and the recovery of those weapons, we first studied the morphology of the weapons. This procedure consist mainly of taking metric measurements and recording features that are visible on the surface such as fabrication stigmata, wear and destruction traces as well as visible surface corrosion. This information was also useful in choosing the parts to be sampled. A total of 27 samples were collected by cutting small pieces of metal using a fine jeweler's saw (blade width 0.3 mm). They were sampled from the cutting edge of the blade and the socket part of the spearheads. Most of them had dimensions smaller than 5 mm. In order to collect reliable information, the samples had to contain a fair amount of sound metal. Their orientation, with respect to the reference axis of the weapon, had to be carefully recorded. Due to the shape and the small size of the samples, they had to be cold mounted in a synthetic resin¹. This resin constitutes a support that facilitates polishing, observation and analyses of the samples. After the mounting was completed, the samples were ground and polished to a 0.25 µm diamond finish in order to create a surface suitable for metallographic observations and chemical analyses. The examination of the samples was made by using a metallographic microscope (reflected light microscopy) and a scanning electron microscope (SEM). The samples were observed from planes corresponding to the cross section, the longitudinal section or the polished surface of the object. This examination allows the study of the structure of the metal constituted from crystals, which are also referred to as «grains» (Pernot 1999). The study of the shape, size and nature of



Pl. 1 - Distribution of the 3 zones and the joint surfaces of the socket.

those crystals or «grains» can reveal information on the different mechanical and thermal treatments that a particular locus of a metallic object underwent. Additional information on those treatments can also be obtained by studying the inclusions that are found within the crystalline structure such as copper sulfide, lead nodules and $\alpha+\delta$ eutectoids. In order to reveal the nature of the crystalline structure, the polished surface of the sample is etched with an alcoholic ferric chloride solution. This solution attacks the grain boundaries revealing the form of the grains (Scott 1991). The composition of the alloys was characterized by using a SEM-EDXS (energy dispersive X-Ray spectroscopy) system. The operating condition for the examinations and the analysis was an acceleration voltage of 20 kV in a «Low Vacuum» environment. This semi-quantitative method is used to detect, with accuracy, the major and the minor elements (more or less about one

weight percent) as well as the characterization of the inclusions. All the compositions presented in this paper are normalized to 100% and are expressed in weight percentage.

Results

- Large socketed spearheads; 12 samples representing various areas of the sockets have been collected (**Table 1**). The metallographic study of those samples revealed that all the sockets have an annealed structure. This crystalline structure (**Fig. 2**) is characterized by polygonal equiaxed grains and some distinctive features such as annealing twins (Scott 1991). This type of crystalline structure is produced by a heat treatment called annealing which is applied after a deformation by cold working. The deformation of a copper alloy distorts its crystalline structure and hardens the metal. If a greater amount of deformation is applied, the metal becomes brittle and cracks might be formed. To prevent the formation of cracks the craftsman softens the metal by annealing. This treatment increases the malleability of the metal and eventually allows the craftsman to continue the deformation of a metallic piece without the risk of breaking it. It is also common that a metallic object would be annealed several times during a deformation process. The final treatment of a metallic object (cold working or annealing) depends on the properties that the craftsman wishes to give to that object. In order to obtain a polygonal equiaxed grain structure, the deformed metal has to be heated at a certain temperature for a certain amount of time: for a 9% tin bronze, the annealing temperature is typically around 700°C and the duration of the process is of some minutes (Andrieu *et al.*, 2000). It's worthy to note that the grain size in the lower zone of the socket (100 µm to 250 µm) is relatively larger than that of the upper zone (50 µm to 100 µm). Most of the large socketed spearheads contained relatively small amount of inclusions compared to the other groups of spearheads. Those inclusions are mainly copper sulfides and $\alpha+\delta$ eutectoids. Large socketed spearhead n°8441, from deposit γ is an exception as it contains a large amount of copper sulfide inclusions and lead nodules. The elongation and the orientation of the copper sulfide inclusions can

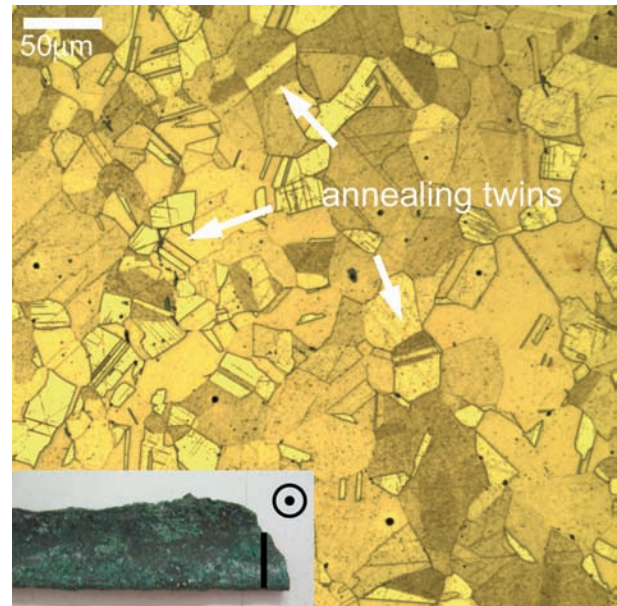


Fig. 2 - Polished surface of the central zone of spearhead n°9667 displaying an annealed structure characterized by its polygonal equiaxed grains and annealing twins (reflected light microscopy, etching with FeCl3 solution).

indicate the general amount of deformation applied by the craftsman and the direction of the deformation flow. Consequently, the correct recording of the inclusions situated in the socket allows us to understand the forming process of this part of the spearhead. The copper sulfide inclusions in the lower zone of the socket are either rounded or oval (**Fig. 3**). In the central and upper zone of the socket they are elongated and in some cases fragmented. The general direction of elongation of the copper sulfide inclusions is oblique to the axis of the spearhead. The joint surfaces of the socket are an exception as the inclusions' elongation in those areas is parallel to the axis of the spearhead. All of the large socketed spearheads were made of a binary bronze with an amount of tin ranging between 12% and 15% (**Fig. 11**). The copper used for alloying could be considered relatively «clean» compared to the copper used in the other types of spearhead. This is confirmed by the small amount of inclusions observed in our samples and by the fact that no elements other than copper and tin were detected by EDXS analysis. In this case also, spearhead n°8441 is different from the others as it contains 0.5% of arsenic and about 1% of lead.

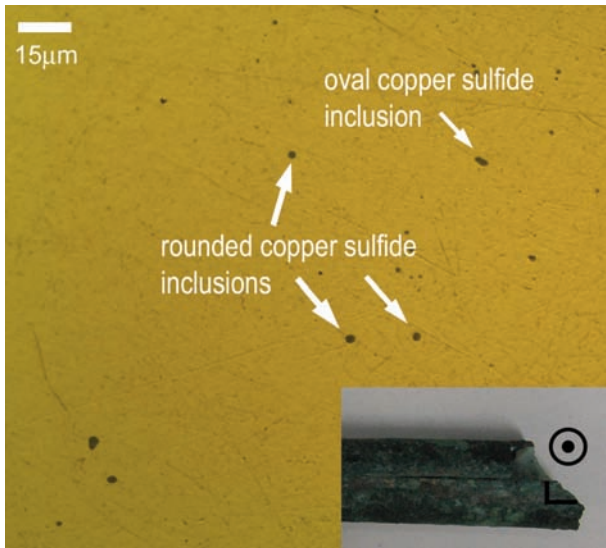


Fig. 3 - Polished surface of the lower zone of spearhead n°9623 displaying rounded and oval copper sulfide inclusions (reflected light microscopy).

- Medium socketed spearheads; only one sample has been collected from the central zone of the socket. The metallographic observations of a cross section of this sample revealed the presence of 2 thin sheets of annealed bronze (thickness between 200 µm and 300 µm each) separated by a layer of an alloy composed of 60% of silver, 36% of copper and 4% of tin (thickness between 50 µm and 80 µm) (Fig. 4). In this layer we observed a crystalline structure composed of some dendrite (a tree shape grain) rich in copper surrounded by multi-phase structure rich in silver (Fig. 5). The fact that undistorted dendrites were found indicates that this layer didn't undergo any treatment (deformation or annealing). In the well preserved contact area, we have detected by EDXS a diffusion of silver from the silver alloy layer into the metallic sheets. This layer presents some corroded areas. The inclusions observed on the polished surface of the two sheets were mainly copper sulfide inclusions. They were all elongated and fractured. The general direction of the elongation is oblique to the axis of the spear head, except in an area in the lower sheet corresponding to the spearhead's joint surface. This area constitute a long stripe where all of the inclusions are parallel to the axis of the spearhead. The two metallic sheets are made of bronze containing 8% of tin (Fig. 11).

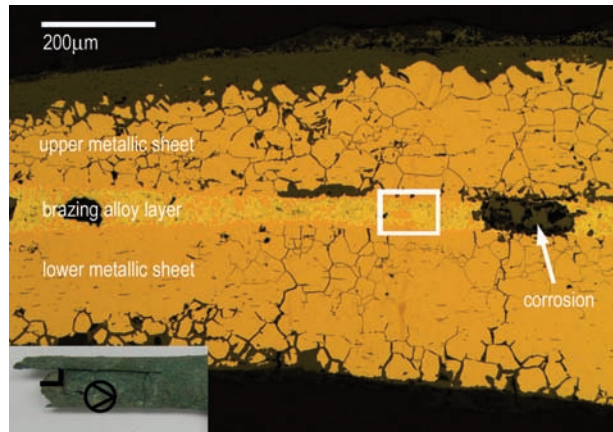


Fig. 4 - Cross section of the central zone of spearhead n°10834 displaying two bronze sheets separated by a brazing alloy (reflected light microscopy).

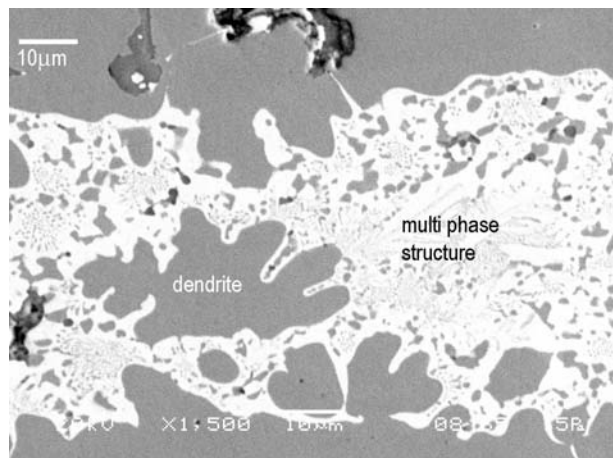


Fig. 5 - Detail of the brazing alloy (area framed with the white rectangle in Fig.4) showing dendrites rich in copper and a multi phase structure rich in silver (SEM image, mode Shadow).

- Small socketed spearheads; 7 samples were collected from the sockets and 1 sample from the cutting edge of the blade of spearhead n°4059. The metallographic observation of the socket samples revealed that this part of the spearhead displays the same features that were observed on the large and medium socketed spearheads. They present an annealed structure. The elongation of the copper sulfide inclusions increases from the lower zone of the socket to its upper zone. The direction of this elongation is mostly oblique (Fig. 6) to the axis of the spearhead except for the joint surface area where the inclusions are parallel to the axis (Fig. 7). The

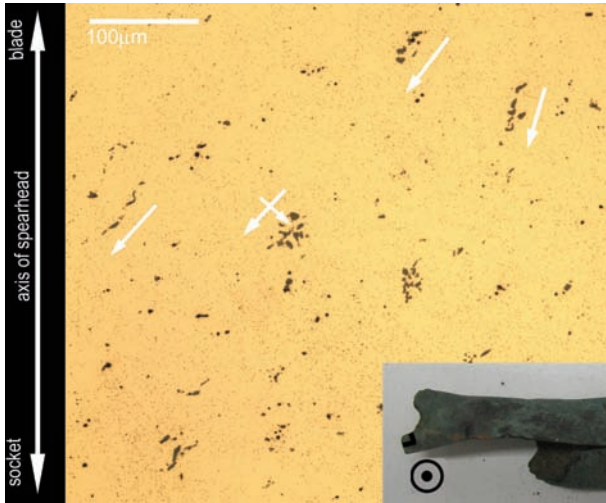


Fig. 6 - Polished surface of the central zone of spearhead n°4059 displaying elongated and fractured copper sulfide inclusions oblique to the axis of the spearhead (reflected light microscopy).

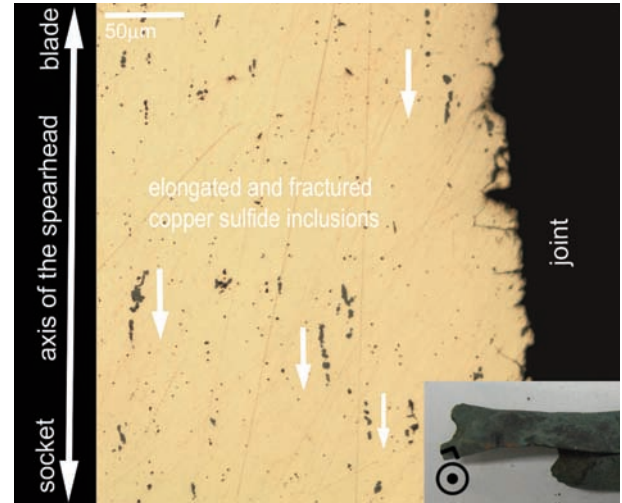


Fig. 7 - Polished surface of the joint surface in the central zone of spearhead n°4059 displaying elongated and fractured copper sulfide inclusions parallel to the axis of the spearhead (reflected light microscopy).

observation of the cutting edge of spearhead n°4059 shows that this part has been deformed after it has been annealed. This process is recognizable from the distorted structure displaying elongated polygonal grains and numerous strain lines resulting from mechanical twinning (Fig. 8). Spearheads n° 4059, 8291 and 10105 were all made of arsenical copper (Fig. 9) with an amount of arsenic ranging between 2% and 4%. Spearhead n° 4059 contains also around 0.5% of tin and n° 8291 from deposit β contains around 1% of antimony. They all present a relatively large amount of copper sulfide inclusions. Spearhead n° 8298 from deposit β was also made from arsenical copper with 9% of arsenic. We have observed in the structure of this object a large amount of arsenic rich inclusions (composed of around 70% of arsenic). It seems that these inclusions are clusters of copper oxides and arsenic oxides formed during the melting or smelting process (Northover 1989). Spearhead n° 8432 from deposit γ is made of a bronze containing 13% of tin and around 1% of lead.

- Folded socket spearheads; 7 samples were collected from the sockets. They all revealed an annealed structure with elongated and fractured inclusions. In n° 8279, n° 8288 and n° 8289 we frequently find antimony and arsenic rich oxides. The copper sulfide inclusions are rare. Only

spearhead n° 8282 contains exclusively copper sulfide inclusions. We haven't had the opportunity to fully study the inclusions in this type of spearheads; consequently, we couldn't define a pattern for the direction of elongation. This is partly due to the fact that the samples were mostly collected from the extremities of the socket. In

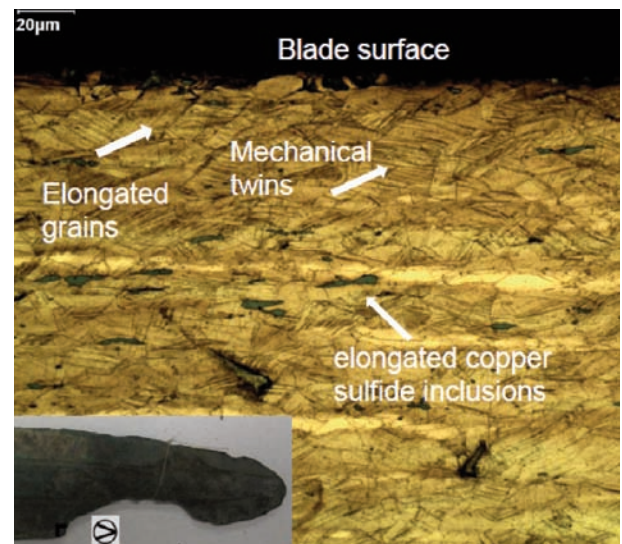


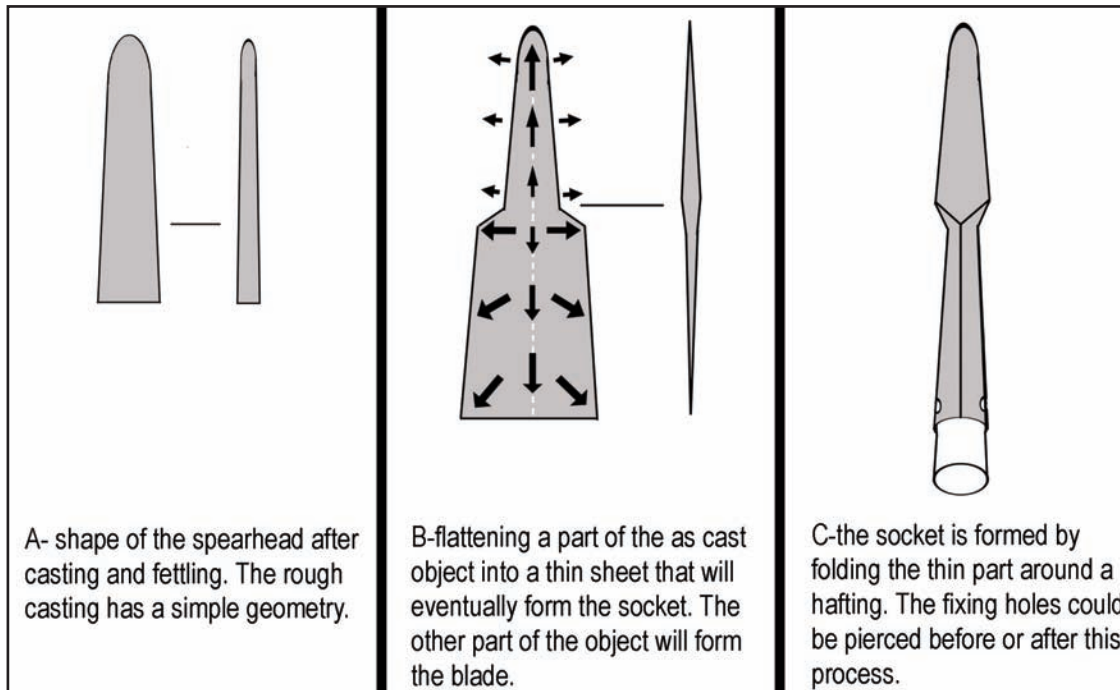
Fig. 8 - Distorted structure observed in the cross section of the cutting edge of spearhead n°4059 displaying elongated polygonal grains, mechanical twins and elongated copper sulfide inclusions (reflected light microscopy, etching with FeCl3 solution).

most cases we found that the inclusions' elongation had many directions (oblique, parallel and perpendicular to the axis of the object). Near the borders of the socket (joint surface and extremity) they are aligned with the border line. All of those spearheads are made of arsenical copper (**Fig. 11**). Spearhead n° 8279, 8288 and 8289 also contain between 0.5% and 2% of antimony.

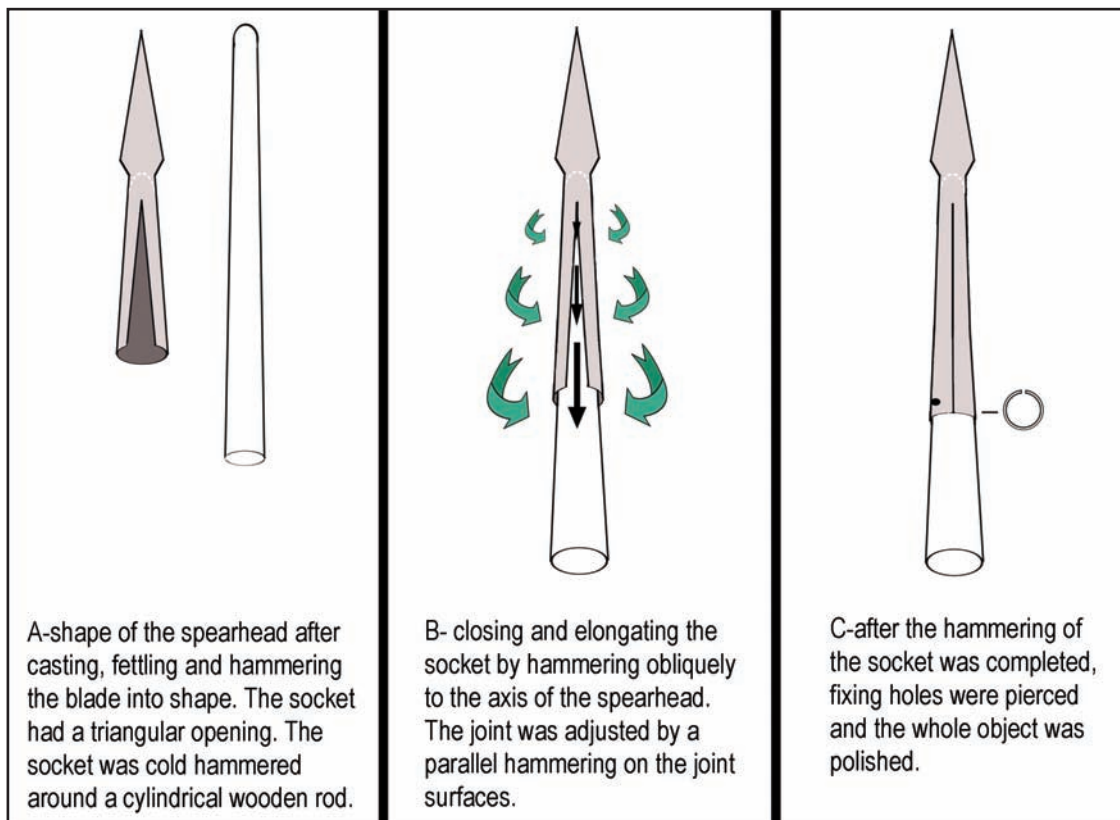
Discussion

The study of the crystalline structure of the selected spearheads allowed us to distinguish two techniques used to make the socket part of those weapons. The distinction between the two techniques is based on two main phases in each one of them: the first phase is making the rough casting² of the spearhead and the second concerns the deformation into the final shape of the weapon. The first technique, described earlier, was used in the folded socket spearheads. It involves a large amount of deformation by cold working on a part of the cast spearhead in order to flatten it into a thin sheet (**PI. 2-B**). This part is eventually folded around a handle and thus forming the socket (**PI. 2-C**). The study of the shape and the deformation of those spearheads allowed us to consider that before the deformation process, the shape of the rough casting presented a simple geometry (**PI. 2-A**). This shape could be obtained by casting of those objects into a 2 piece mould. The arsenic and antimony oxides found in the folded socket spearheads n° 8279, n° 8288 and n° 8289 are the results of the interaction between the molten alloy and an oxygen rich environment. Such phenomenon was observed by Northover (1989: 111) during his experimental work on the properties of arsenical copper. These conditions could have occurred while melting the alloy or while pouring it into a mould³. The second technique was used to make the large, medium and small socketed spearheads. The copper sulfide inclusions observed in those weapons, have similar directions and their elongation follows one particular pattern (cf. *infra*). The study of the inclusions and the microstructures revealed the direction and the amount of the applied deformation. Consequently it allowed us to reconstitute the different phases of the socket forming process. After the rough casting was

obtained, the socket of the spearhead would have had a hollow Truncated cone shape with a large triangular opening (**PI. 3-A**). The base of this triangular opening would have been at the end of the upper zone and the vertex at the beginning of the lower zone. After the fettling process⁴ was completed, the craftsman would have applied an oblique cold hammering in order to elongate the socket and to close the opening (**PI. 3-B**). This action caused the copper sulfide inclusions to elongate in an oblique-to-axis direction. Due to the triangular shape of the opening, a gradual amount of deformation would have been required to close the socket. Therefore the deformation by cold hammering would have increased from the lower to the upper zone. This action is revealed by the elongation of the copper sulfide inclusions; they are round and oval in the lower zone but their elongation increases gradually towards the upper zone where in some cases they become fractured. The difference in grain size between those two zones is another indicator of the difference in the amount of deformation. The oblique deformation would have created irregularities on the opening's sides, thus an adjustment of the joint surfaces would have been required during or after the closing process of the socket. The adjustment would have been done by cold hammering all along the joint surfaces. Consequently, the direction of the inclusions within this area is parallel to the axis. To prevent the cracking of the socket, the cold hammering process would have been interrupted by several passes of annealing in order to soften the metal. Once the cold hammering process was completed, the socket was annealed to increase its malleability. The cutting edge of the blade was also put into shape and sharpened by a cold work deformation interrupted by one or many annealing passes. The final treatment applied on the cutting edge, was a deformation applied to increase its sharpness and hardness. Casting of this complex shape of the rough casting would have required the use of lost wax molding or a three piece mould. This last type of mould would have been constituted of two pieces that will give the external shape of the rough casting and a core that will give the internal shape of the socket. In both moulds the socket part would have presented narrow section cavities⁵. In the case of the large socketed spearheads, filling the long and thin socket pattern



Pl. 2 -



Pl. 3 -

cavities with molten metal could present some difficulties (Campbell 2004: 75-78). Therefore an alloy presenting good casting properties is required. Because of its rich tin content (12% to 15%), the bronze used in these spearheads (Fig. 9) is relatively fluid⁶ (Amendola 2010). However, this alloy is hard (Northover 1989, Lechtman 1996), thus difficult to deform as these amount of tin will form many nodules of $\alpha+\delta$ eutectoid during solidification⁷. The δ phase being brittle might lead to cracking during cold working. Therefore, the craftsman had to apply several passes of small amount of deformation by cold hammering followed by annealing, thus dissolving the main part of the $\alpha+\delta$ eutectoids. The copper used in the large socketed spearhead (except n°8441) is relatively «clean» as the inclusion and impurity level is much lower than in the other spearhead groups. The use of «clean» copper might be another solution to reduce the risk of producing cracks as inclusions represent potential cracking sites during deformation (Andrieu *et al.* 2000). Except for n° 8298 all spearheads made of arsenical copper were found to contain between 2% and 5% of arsenic (Fig. 9). It appears that arsenical copper alloys containing less than 2% arsenic were not considered suitable for making this kind of weapons and in some cases, such as spearhead n°8441, they were recycled or alloyed with high amount of tin. In the medium socketed spearhead n°10834, the two sheets of bronze were joined together by brazing. This technique consists of melting a metal or alloy

between two metallic pieces (Fig. 4). The brazing alloy must have a melting point lower than that of the pieces to be joined (Marion 1971: 5-13). The alloy used in spearhead n°10834 (silver-copper-tin) melts at a temperature ranging between 750°C and 800°C while the alloy of the two sheets (bronze with 8% tin) starts melting at 900°C and completely melts at about 1030°C. When this spearhead was first published (Dunand 1950: Pl. LXXVIII) the socket was complete, nowadays it is in a fragmentary state. Therefore there is a possibility that the brazing is a modern attempt of restoration which would have failed. But this hypothesis is challenged by two facts:

- The brazing alloy is completely corroded in several areas, which might indicate its old age.
- In the well preserved areas we detected a minor diffusion of the brazing metal in the two bronze sheets. There isn't any corrosion separating those three layers and there isn't any sign of removing the corrosion on the sheets which is something that would be expected if the sheets are old and the brazing metal is recent. If the brazing is an ancient application, the second sheet would have been applied as reparation for the first sheet which is the socket. Another more probable possibility would be that the second sheet is a fragment of a metallic collar. Such collars were found around the sockets of the other spearheads discovered in the same deposit. The collar had two different applications: the long collar was used to increase the length of a short socket (spearhead

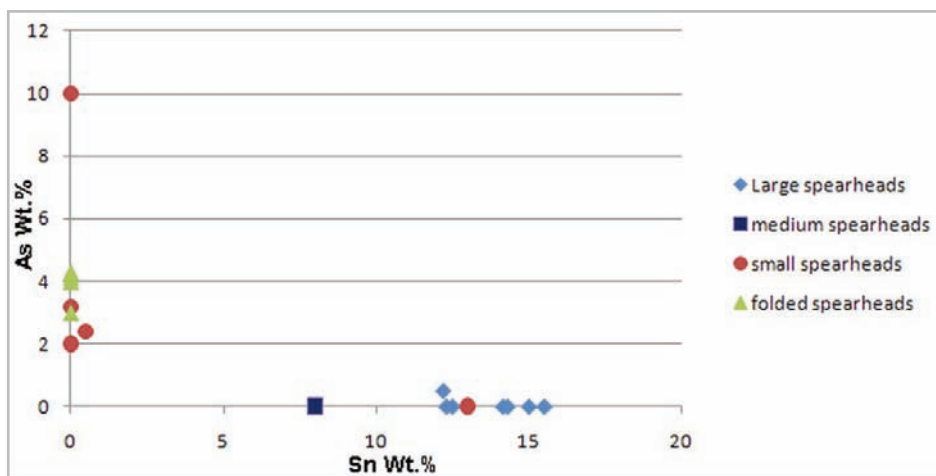


Fig. 9 - Plot showing the Tin (Sn) versus the arsenic (As) composition according to each group of spearhead.

n°10836, 10838, 10839, 10845, 10846). As for the short collar, it was used to squeeze the socket on the handle (spearhead n°10840, 108431).

Conclusion

A comparison between the folded socket spearheads and the other socketed spearheads shows a clear difference in the quality of the products and their manufacturing process. It seems that the type of mould used was decisive in determining the final shape of the object. The two piece mould produced simple shapes while the three piece mould or lost wax molding process produced complex shapes of rough casting that could not be obtained by cold working. This difference in quality could also be seen in the finishing and decoration of the objects: rudimentary in the folded socket spearhead and elaborated in the other spearheads. There are strong chances that those 2 techniques represent two different workshops. As the all of the folded socket spearheads were exclusively found in deposit β , the possibility of a foreign importation of those weapons is to be considered. However more studies are required before a conclusion can be drawn regarding this subject. Further investigation of the socketed spearhead from deposit χ is required in order to define the nature of the brazing used in spearhead n°10834. The study of those weapons revealed some of the craftsmen knowhow in both casting and deformation techniques:

- The use of complex molding systems such as three piece moulds or lost wax moulds.

- The capacity to cast in narrow (< 3 mm) and long (> 10cm) mould cavities.

- A thorough knowledge in some of the alloys properties, for example adding high amount of tin (12%) to increase the fluidity and to improve the penetration capacity of the molten alloy in the pattern cavities of the mould and preferring arsenical copper with 2% arsenic or more for better mechanical properties.

- The existence of several quality of copper; the «cleanest» copper appeared to be reserved to the Large socketed spearhead production. The distinction between different qualities of metal is reported in MB texts such as the correspondence of the Assyrian merchants of Karum Kaniš in Anatolia.

According to Michel (2001) there were 3 different qualities of copper and tin «excellentes, «bonne» and «mauvaise». However those texts don't mention on which basis these distinction were made.

- The effects of cold working and annealing were well understood, for example cold working was applied as a final treatment to harden the cutting edge of the blade and annealing was applied to make the socket malleable.

- In the large spearheads, careful planning of the whole fabrication process was required to achieve the final shape of the weapon. It began with the design of a mould capable of withstanding the heat generated by the molten metal. This mould had to reproduce the complex shapes of the spearhead without causing casting defects. The choice of the alloying elements was decisive to obtain a metal with good casting and mechanical properties. The amount and direction of the cold hammering work passes as well as the temperature and duration of the annealing had to be well controlled in order to prevent the initiation of cracks. We were not able to understand the exact purpose behind the use of a bronze containing more than 12% of tin, as many experiments show that the highest fluidity and the best workability⁸ is obtained with bronzes containing between 8% and 12% tin (Piccardo *et al.* 2004, Amendola 2010). It is probable that the craftsman was aiming to produce a very hard weapon by adding high amounts of tin⁹. Other reasons should also be considered such as color effect and economic value related to the use of high amounts of tin. This paper constitutes a small insight on the metallurgical knowhow of MB I Levant craftsmen. The study of this metallurgy is of great importance as this period witnessed the beginning of the regular adding of tin in copper based alloys (Moorey and Schweizer: 1972)¹⁰. We believe that the ability to control the quantity of tin in a copper alloy allowed the craftsmen to control and improve the mechanical and casting properties of that alloy and to obtain the same quality regularly¹¹. Therefore it is interesting to study the influence of this phenomenon on metallurgical techniques and to investigate its relation with the emergence of new weapon types. In order to do so, an extensive technological study is required to trace the evolution of the Levantine metallurgy from its beginning.

Notes

1- The resin is a poly (methyl methacrylate) that polymerizes under blue light.

2- A product obtained directly by casting before undergoing any modifications such as fettling.

3- Based on the quantities of the oxide inclusions and their absence in the other arsenical copper weapons, we assume that those folded socket spearheads have been made in a relatively oxygen-rich environment.

4- Fettling is a process where all excess metal such as burrs, runners and overflows are removed from the cast object.

5- The pattern cavities are the area of the mould destined to receive the molten metal and to reproduce the shape of the desired object.

6- Bronze alloys containing between 8% and 12% of tin were found to be the most fluid with the highest fluidity corresponding to bronze with 10% of tin. Ms. Amendola measured the fluidity of various bronze alloys by using a triple spiral permanent steel mould. Fluidity is defined as «a measure of the distance to which a metal will flow before solidifying and is thus one factor determining the ability of a molten alloy to completely fill a mold cavity in every detail» (Piccardo *et al.* 2009, Amendola 2010: 53). However measuring of the fluidity from the *effective length* of a cast spiral presented difficulties in reproducibility due to problems related to the different mode of solidification of each alloy, such as the thinning of the end of each cast spiral. Therefore the author measured the fluidity by determining an *equivalent length* that depends on the weight of the metal in the spirals by considering that the «molten metal run fills homogeneously through the whole mold cross section».

7- Based on Lechtman (1996) and Northover's (1989) studies we can conclude that among the alloys that we found (both bronze and arsenic copper) the bronze alloys containing 12% to 15% of tin present the highest hardness.

8- This conclusion was drawn as the bronze alloys containing between 7% and 12% of tin exhibit the largest elongation after being annealed as well as after a 50% cold rolling deformation.

9- «A proportional relation exists between hardness and the increasing of tin content» (Piccardo *et al.* internal laboratory report)

10- By compiling and studying many post-1970 chemical analyses on weapons in the Levant, we arrived to the same conclusion as Moorey and Schweizer; in the Early Bronze Age the dominant alloy was the copper arsenic.

11- There are still uncertainties concerning how the arsenical copper is obtained as up until now it hasn't been determined if the arsenic found in the alloy occurred naturally in the copper ore or if it was an intentional addition.

Bibliography

- Amendola, R. 2010.** *Influence of alloying elements on properties of casting copper base alloys*, Unpublished Ph.D. thesis, Università degli studi di Genova, Genoa.
- Andrieu, S., Bayle, B., Pernot, M. and Welter, J.-M. 2000.** Influence de diverses inclusions sur le comportement d'un bronze CuSn9 sous différentes sollicitations mécaniques, *La Revue de Métallurgie (May issue)* : 599-611.
- Campbell, J. 2004.** *Casting practices, the 10 rules of casting*, Elsevier, Hungary; 75-78
- Dunand, M. 1939.** *Fouilles de Byblos. Tome I: 1926-1932. Texte*, Librairie orientaliste Paul Geuthner, Paris.
- **1950.** *Fouilles de Byblos. Tome II: 1933-1938. Atlas*, Librairie d'Amérique et d'Orient, Adrien Maisonneuve, Paris.
- **1954.** *Fouilles de Byblos. Tome II: 1933-1938. Texte**, Librairie d'Amérique et d'Orient, Adrien Maisonneuve, Paris.
- Gernez, G. 2007.** *L'armement au Proche et Moyen-Orient des origines à 1750 av.J.-C.*, Unpublished Ph.D thesis, Université Paris I, Paris.
- Lechteman, H. 1996.** Arsenic Bronze: Dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas, *Journal of field archaeology*, Vol. 23, No. 4, Boston; 477-514.
- Marion, H. 1971.** *Metalwork and enamelling*, Fifth revised edition, Dover Publications, New York ; 5-13
- Michel, C. 2001.** *Correspondance des marchands de Kaniš au début du IIe millénaire avant J.-C.*, Littératures anciennes du Proche-Orient, Les Editions du Cerf, Paris.
- Moorey, P.R.S and Schweizer, F. 1972.** Copper and copper alloys in ancient Iraq, Syria and Palestine: some new analyses, *Archaeometry* 14, Oxford: 177-198.
- Northover P. 1989.** Properties and use of arsenic-copper alloys, *Old world archaeometallurgy*, Bochum: 111-118.
- Pernot, M. 1999.** La métallographie, in *A la recherche du métal perdu*, Editions Errance, Paris, pp. 65 – 69.
- Philip, G. 1989.** *Metal weapons of the Early and Middle Bronze Ages in Syria-Palestine*, BAR International Series, Oxford.
- Piccardo, P., Amendola, R., Natali, S., Ammannati, N., Martellucci, E. 2004.** *Some aspect of tin amount influence in -bronzes*, Internal laboratory report of the Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale.
- Piccardo, P., Amendola, R., Adobati, A., Faletti, C., 2009.** Studio della fluidità di leghe a base rame, *La metallurgia italiana (May issue)*: 31-38.
- Scott, D. A. 1991.** *Metallography and microstructure of ancient and historic metals*, The J. Paul Getty Trust, Singapore.

Acknowledgment

This study constitutes a part of the PhD thesis of M. Ziad EL MORR that is currently undergoing in the IRAMAT-CRPAA laboratory (UMR5060, CNRS – University of Bordeaux 3) under the direction of M. Michel PERNOT (DR-CNRS). The authors wish to thank the Directorate General of antiquities in Lebanon for authorizing the study of this material, M. Assaad Seif (DGA) for his support and his useful archaeological advices, Ms. Rana Andari (DGA) and Ms. Carole Atallah (DGA) for facilitating the access to the archaeological material and M. Guillaume Gernez for his help concerning the typology of MB I weapons. The authors also wish to thank CNRS France for supporting and financing this Thesis.

Ziad EL MORR

La métallurgie du Levant au Bronze Moyen à travers les armes

Soutenue le 15 novembre 2011 à l'université Michel de Montaigne, Bordeaux 3

Résumé

Cette étude porte sur la métallurgie des alliages cuivreux du Bronze Moyen dans la région du Levant. Le corpus étudié est constitué d'armes provenant des sites libanais de Byblos, d'Arqa, de Khariji et de Yanouh. L'objectif de ce travail a été d'enrichir la connaissance sur le savoir-faire technique des artisans de l'époque afin d'intégrer ces nouveaux résultats dans le champ disciplinaire de l'histoire des techniques métallurgiques. La méthodologie mise en œuvre dans ce travail comprend plusieurs volets. Des analyses élémentaires ont été menées afin de retrouver les recettes des alliages employées. Des indices sur les techniques de mise en forme ont pu être révélés par des examens métallographiques. L'ensemble de ces résultats ont permis d'élaborer des hypothèses sur les chaînes opératoires mises en œuvre dans la production de ces armes. Des travaux d'archéologie expérimentale visant à retracer les étapes de fabrication de ces objets ont permis de tester la validité d'un certain nombre d'hypothèse. Enfin, notre approche, résolument tournée vers l'Archéométrie, a consisté dans un deuxième temps à confronter ces données d'ordre technologique à des informations plus classiquement archéologiques (typologies, sources textuelles, contextes). Nous avons ainsi pu mettre en évidence, à travers l'interprétation des pratiques et des choix des artisans, divers aspects du rôle des armes en tant que vecteur culturel dans la société de l'époque.

Mots clefs : **Levant, Bronze Moyen, métallurgie, alliage cuivreux, artisans, savoir-faire.**

Abstract

This work aims to study the copper base alloy metallurgy in the Middle Bronze Age Levant. The corpus is constituted of weapons from the Lebanese sites of Byblos, Arqa, Khariji and Yanouh. The main objective of this work is the investigation of the knowhow of the MB craftsmen, thus contributing to the understanding of the technological history of this region. Several methods are used for this matter. The alloy recipes were identified with elemental analysis. Manufacture techniques were determined using metallographic observations. The collected data allowed the reconstruction of several phases of the weapon production process. Experimental recreations were undertaken to test the validity of the fabrication process models proposed in this study. All these results were then compared and confronted to the archaeological data (contextual evidence, written sources, and typology). This approach allowed the identification of the craftsmen's choices and practices. Furthermore it contributed to the understanding of the role of the weapons as a cultural vector.

Keywords: **Levant, Middle Bronze Age, metallurgy, copper base alloys, craftsmen, knowhow.**

Catalogue

Sommaire

Haches Fenestrées étroites.....	2
Haches fenestrées larges.....	25
Poignards à lame simple.....	37
Poignards à lame décorée.....	55
Pointes de lances à languette rivetée.....	73
Pointes de lances à douille longues.....	95
Pointes de lances à douille moyennes.....	115
Pointes de lances à douille courtes.....	123

Haches fenestrées étroites

Hache fenestrée étroite 6270



Longueur totale: 116 mm	longueur de la fenestrelle interne: 27 mm
Longueur du collet : 53mm	Largeur minimale de l'axe médian: 7 mm
Ouverture du collet : 32 x 18 mm	Largeur mnimale de l'axe latéral: 11 mm
Epaisseur du collet : 1 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 15 mm
Epaisseur maximale de la lame : 20 mm	Poids : 250 g
longueur de la fenestrelle externe: 41 mm	

Cette hache a été trouvée dans le dépôt σ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 380, 1950 ; pl. 124). Elle est en bon état de conservation et ne comporte pas de stigmates de fabrication. Les fenestrelles sont ovales et le collet est droit. La hache est recouverte d'une corrosion à texture fine. Sur l'une des faces de l'objet, une corrosion de couleur gris sombre est dominante sur l'autre face la couleur dominante est le brun clair. La surface de l'objet présente également une corrosion localisée sur le collet où on trouve des bubons et des croûtes de couleur verte. Un échantillon à été prélevé pour étudier la coupe du collet.

Au niveau du collet, l'alliage présente une structure dendritique. Cependant nous trouvons sur la partie superficielle une couche de grains recristallisés causés par une faible déformation suivie d'un recuit (Fig.1).

L'alliage utilisé est un bronze au plomb avec 8 Wt.% d'étain et 7 Wt.% de plomb.

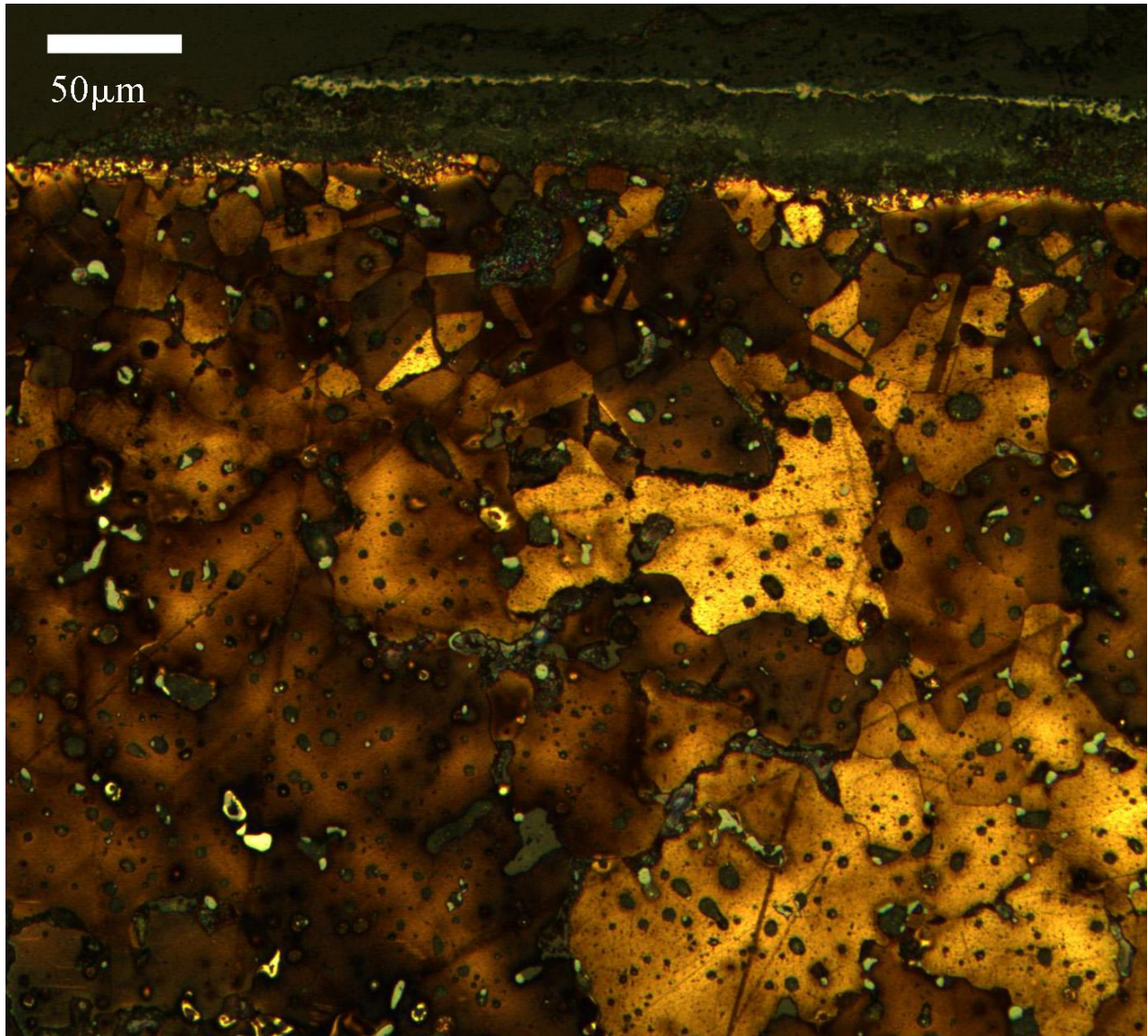


Figure 1: coupe transversale du collet présentant une structure dendritique avec des grains recristallisés dans la zone (en haut) correspondant à la surface (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Hache fenestrée étroite 6271



Longueur totale: 108 mm	longueur de la fenestrelle interne: 28 mm
Longueur du collet : 50mm	Largeur minimale de l'axe médian: 6 mm
Ouverture du collet : non disponible	Largeur minimale de l'axe latéral: 10 mm
Epaisseur du collet : 0.5 à 1 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 12 mm
Epaisseur maximale de la lame : 15 mm	Poids : 208 g
longueur de la fenestrelle externe: 35 mm	

La hache a été trouvée dans le dépôt σ du *champ aux offrandes* (Dunand 1954 ; 380). Elle ne présente aucun stigmat de fabrication. Par contre, il y a une dissymétrie au niveau de la courbure de la lame. On note aussi que le collet est cassé dans le sens de son axe. Il a été plié suite à une pression. Il est difficile de préciser si c'est la pression qui a cassé le collet ou la cassure qui a facilité le pliage durant la pression. Les zones d'intersection entre le collet et les axes de fenestrelles ont été également endommagées; celle de l'axe médian est cassée. La partie du collet joignant l'axe latéral est détachée. Celle-ci a fait l'objet de trois prélèvements.

Les observations métallographiques ont révélé sur les trois prélèvements une structure dendritique (Fig.2). L'observation des tranches montre que la surface de l'objet a été lissée, éliminant ainsi toutes les pores de la surface formées par la fuite des gaz lors du remplissage du moule par le métal en fusion (Fig.3).

L'alliage utilisé est du bronze avec 93 Wt.% de cuivre, 4 Wt.% d'étain et 3 Wt.% de plomb.

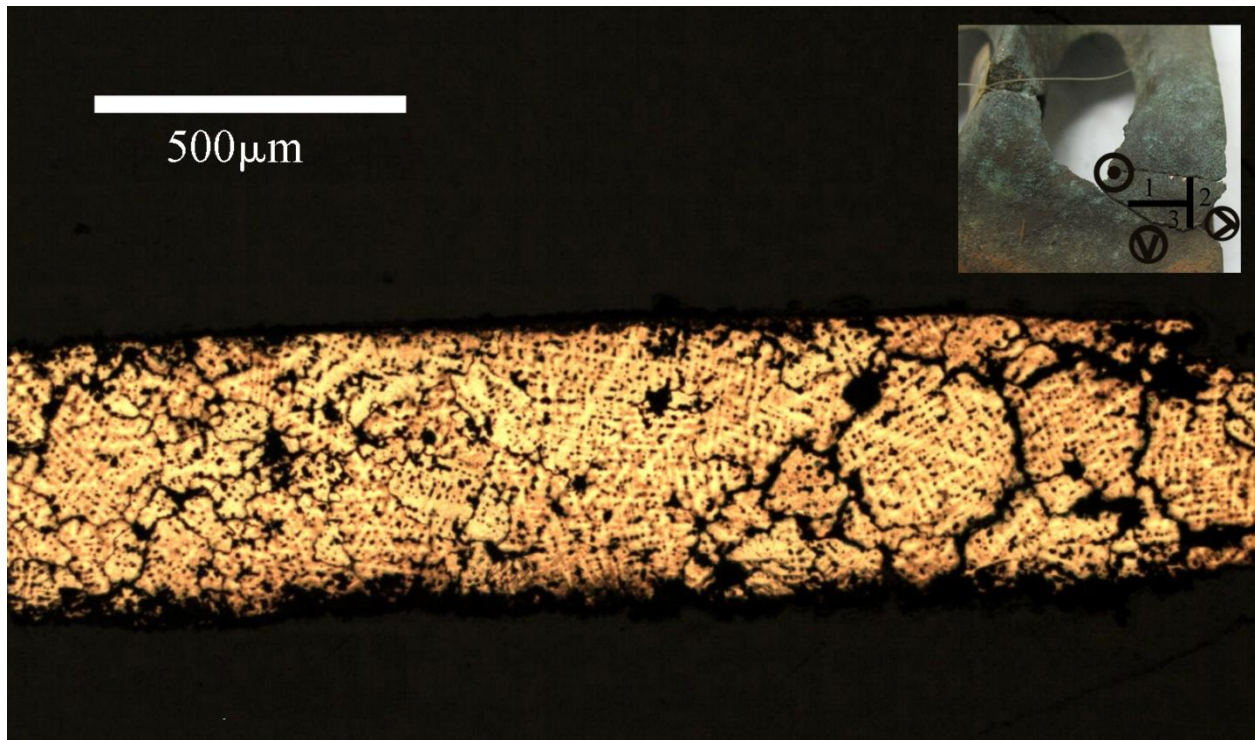


Figure 2 : structure dendritique observée à partir d'une coupe longitudinale (2) du collet (Microscope optique en réflexion, attaque au FeCl_3)

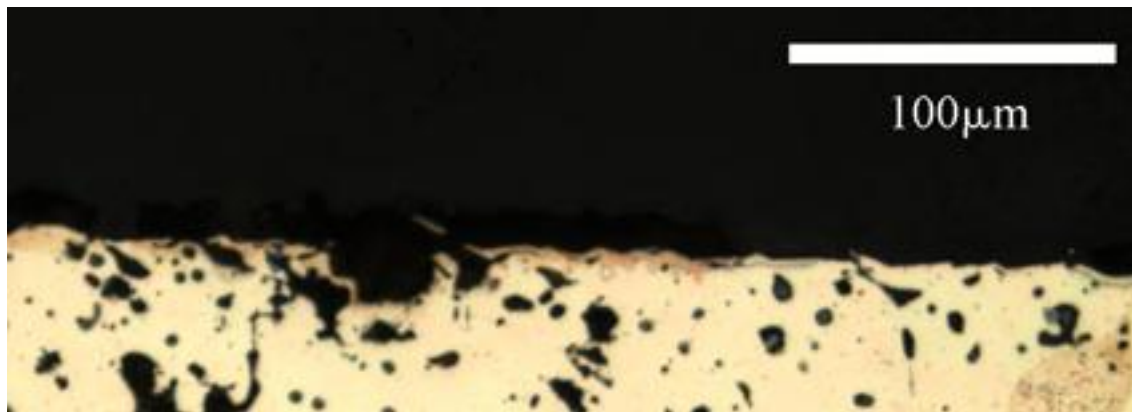


Figure 3: détail de la coupe longitudinale (2) surface lissée observée sur la tranche du collet (Microscope optique en réflexion)

Hache fenestrée étroite 6272



Longueur totale: 81 mm	longueur de la fenestrelle interne: non disponible
Longueur du collet : 48mm	Largeur minimale de l'axe médian: 8 mm
Ouverture du collet : non disponible	Largeur mnimale de l'axe latéral: 7 mm
Epaisseur du collet : 1 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 11 mm
Epaisseur maximale de la lame : 17 mm	Poids : 136 g
longueur de la fenestrelle externe: 31 mm	

Cette hache a été trouvée dans le dépôt σ du *champ aux offrandes* (Dunand 1954 ; 380). Une de ses faces présente quelques trous de fonderie, à texture lisse, de diverses dimensions (Fig. 4). La plupart de ces trous sont concentrés sur un côté de la partie supérieure de la face en question. Ils ont une direction oblique à l'axe de l'objet et une légère inclinaison. Le fond de ces trous est dirigé vers le collet. Sur le même côté de la lame nous observons une rayure oblique à l'axe de l'objet au niveau du tranchant. La hache est couverte par une corrosion homogène à texture fine. Sur l'une des faces de l'objet, la corrosion de couleur gris sombre est dominante sur l'autre face la couleur dominante est le brun clair. Nous avons remarqué qu'au dessous de la couche de corrosion marron clair nous avons la même couche gris sombre observée sur l'autre face de la hache. Le collet a été cassé et par conséquent seule une partie de la pièce subsiste. Un échantillon a été prélevé dans le collet pour observer sa coupe.

Le collet est en état brut de fonderie. Nous avons détecté au niveau de sa surface des macles mécaniques et une légère déformation des pores, qui sont probablement causées par la cassure du collet.

L'alliage utilisé est constitué de 73 Wt.% de Cu, 3.5 Wt.% de As, 3.5 Wt.% de Sn et 20 Wt.% de Pb.



Figure 4 : zone supérieure d'une face de la lame présentant des trous de fonderie inclinés et obliques par rapport à l'axe de la hache ainsi qu'une rayure au niveau du tranchant.

Hache fenestrée étroite 6273



Longueur totale: 103 mm	longueur de la fenestrelle interne: 31 mm
Longueur du collet : 43 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 6 mm
Ouverture du collet : 28 x 14 mm	Largeur minimale de l'axe latéral: 8 mm
Epaisseur du collet : 0.7 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 9 mm
Epaisseur maximale de la lame : 14 mm	Poids : 127 g
longueur de la fenestrelle externe: 42 mm	

Cette hache a été trouvée dans le dépôt σ du *champ aux offrandes* (Dunand 1954 ; 380). Une partie du collet est cassée et repliée vers l'extérieur. La hache est recouverte d'une corrosion à texture fine. Sur l'une des faces de l'objet, une corrosion de couleur gris sombre est dominante sur l'autre face la couleur dominante est le brun clair. L'ensemble de l'objet est parsemé de trous de fonderie causés par l'échappement des gaz lors de la coulée du métal. Les trous sont concentrés sur la lame et sont inclinés. L'inclinaison est du sens de l'axe de la lame. Cet indice, indique que la coulée a été faite en introduisant le métal du côté de la lame avec une forte inclinaison du moule. Deux prélèvements ont été effectués afin d'observer leurs tranches perpendiculaires : un au niveau du collet, l'autre près de la partie ondulée du tranchant. Le collet a une structure dendritique comprenant des secondes phases, des inclusions de sulfure de cuivre et très rarement des nodules du plomb (Fig.5).

La coupe du tranchant a révélé deux zones bien distinctes correspondant aux deux faces du tranchant : Une possède une structure dendritique avec beaucoup de macles mécaniques essentiellement sur la surface. Dans l'autre, les dendrites ne sont pas discernables, les inclusions de sulfure de cuivre et les pores sont très allongées (Fig. 6). Ces indices indiquent que cette zone est fortement déformée.

L'alliage utilisé est un bronze à 89 Wt.% de cuivre et 8 Wt.% d'étain. Le reste est constitué d'impuretés comme de l'arsenic à 1 Wt.%, du nickel à 1 Wt.% et du plomb à 0,7 Wt.%.

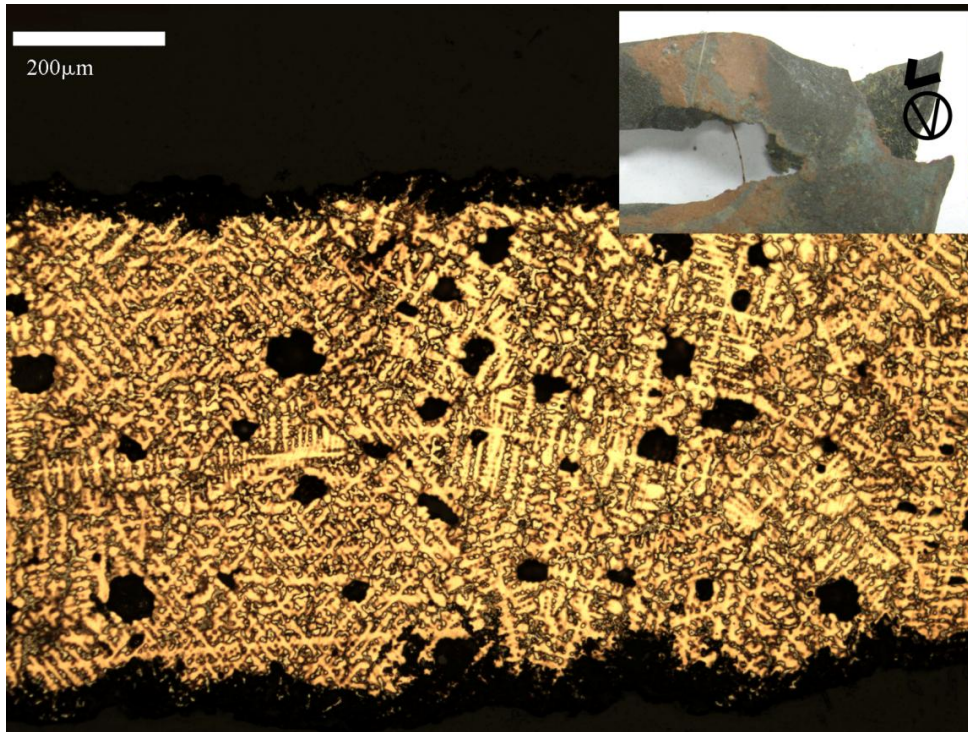


Figure 5: structure dendritique du collet, vue à partir d'une coupe longitudinale du collet (Microscope optique à réflexion, attaque avec une solution de FeCl_3).

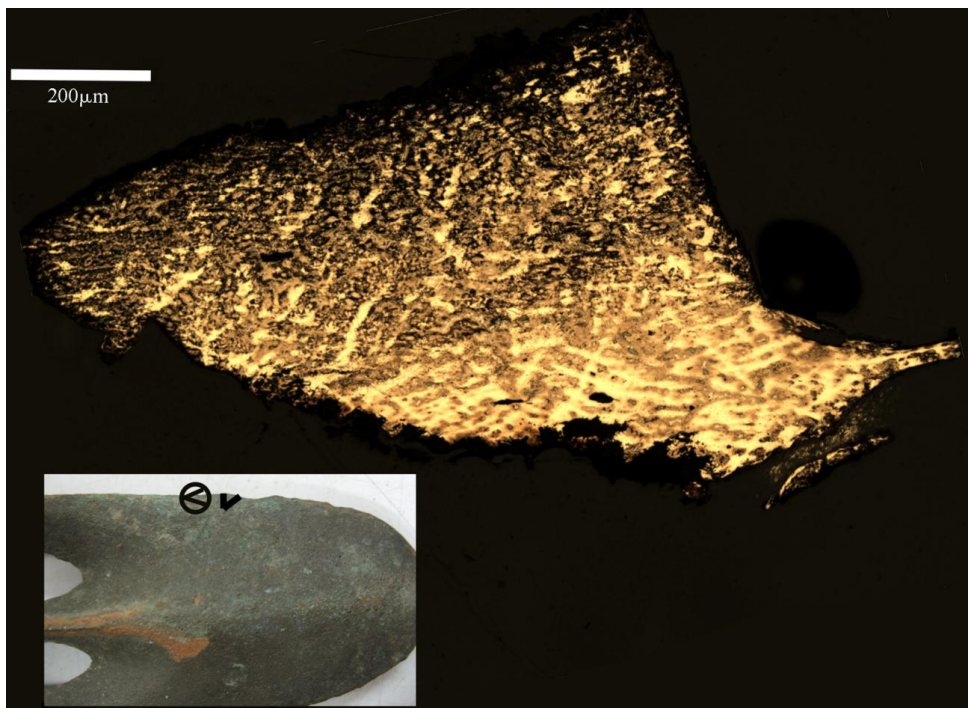


Figure 6 : observation d'une coupe du tranchant présentant deux zones distinctes : une zone avec un état fortement écroui (partie supérieure) et une zone moins déformée où les dendrites sont visibles (partie inférieure) (Microscope optique à réflexion, attaque avec une solution de FeCl_3).

Hache fenestrée étroite 6281



Longueur totale: 35 mm	longueur de la fenestrelle interne: non disponible
Longueur du collet : 48 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 10 mm
Ouverture du collet : non disponible	Largeur minimale de l'axe latéral: non disponible
Epaisseur du collet : 0.7 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: non disponible
Epaisseur maximale de la lame : non disponible	Poids : 17 g
longueur de la fenestrelle externe: non disponible	

Ce fragment appartient au dépôt α du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 155). Il ne subsiste de la hache que le collet et une partie de l'axe médian des fenestrelles décoré en son milieu par un filet. Il est préservé de la corrosion mais il est cassé et fissuré en plusieurs endroits. La hache est recouverte d'une corrosion à texture fine de couleur gris sombre. La surface comprend deux types de stigmates : Une rayure parallèle à l'axe du collet et des trous de fonderies sur l'ensemble de l'objet dont certains ont une inclinaison du sens supérieur de l'axe de l'objet. Cet élément pourrait indiquer que la coulée a été faite du côté de la lame en introduisant le métal dans un moule incliné.

Afin d'examiner les tranches des fenestrelles et de l'axe médian, ainsi que celles du collet 4 prélèvements ont été effectués. Tous les échantillons ont une structure dendritique avec des macles mécaniques sur toute la surface. Ces dernières sont, au moins en partie, produites lors de la destruction de la hache. D'autres peuvent aussi être le résultat d'un polissage violent. La structure contient également des nodules de plomb, des inclusions de sulfure de cuivre circulaire et de seconde phase ($\alpha+\delta$) ainsi que des pores. Le prélèvement de l'axe médian (Fig. 7 et 8) montre que le décor en filet a une structure dendritique. La présence de macles mécaniques, et de quelques pores allongés ainsi que d'une cavité est attestée dans cette zone. Elles résultent plus de la destruction de l'objet que de sa conception.

L'alliage utilisé est quaternaire. Il est composé de 82 Wt.% de cuivre, 3 Wt.% d'étain, 3 Wt.% d'arsenic et 12 Wt.% de plomb.

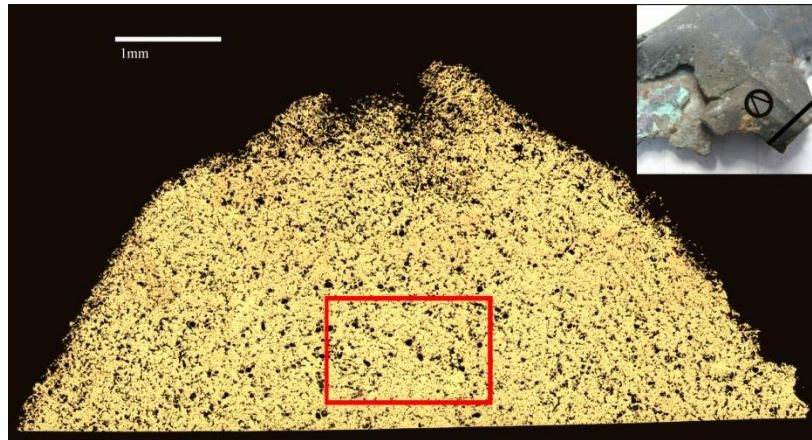


Figure 7 : coupe transversale de l'axe médian (Microscope optique en réflexion).

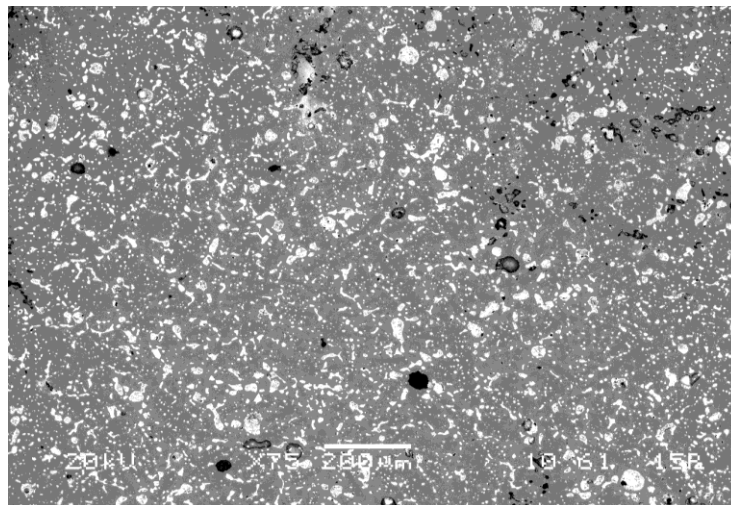


Figure 8 : détail de la zone encadrée dans la figure 7 montrant la forte concentration des nodules de plomb de couleur blanche (MEB mode shadow)

Hache fenestrée étroite 8349



Longueur totale: 118 mm	longueur de la fenestrelle interne: 28 mm
Longueur du collet : 50 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 5 mm
Ouverture du collet : 34 x 18 mm	Largeur minimale de l'axe latéral: 9 mm
Epaisseur du collet : 1 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 11 mm
Epaisseur maximale de la lame : 17 mm	Poids : 233 g
longueur de la fenestrelle externe: 39 mm	

Cette hache a été trouvée dans le *tombeau de particulier n°3* (Montet, 1928 ; 247). Elle possède des fenestrelles ovales resserrées et un collet droit. Son collet diffère des autres étudiés dans notre corpus par l'existence de larges bandes plates et parallèles entre elles. Celles-ci ont pour effet de rendre la forme du collet plus anguleuse. La hache est recouverte d'une corrosion homogène fine de couleur gris sombre. Sur une des faces de l'arme nous observons une corrosion localisée de croûte terreuse au niveau du collet et de la lame. Sur cette même face le collet présente une déchirure (Fig.9). Un échantillon a été prélevé pour observer sa coupe.

L'examen en microscope optique montre que le collet est en état brut de fonderie (Fig.10). Nous avons détecté la présence d'une grande quantité de nodule de plomb ainsi que de formations de seconde phase. L'alliage utilisé est globalement composé de 71 Wt.% de Cuivre, 5 Wt.% d'arsenic et 23 Wt.% de plomb.



Figure 9 : emplacement du prélèvement, de la déchirure et de la croûte sur le collet.

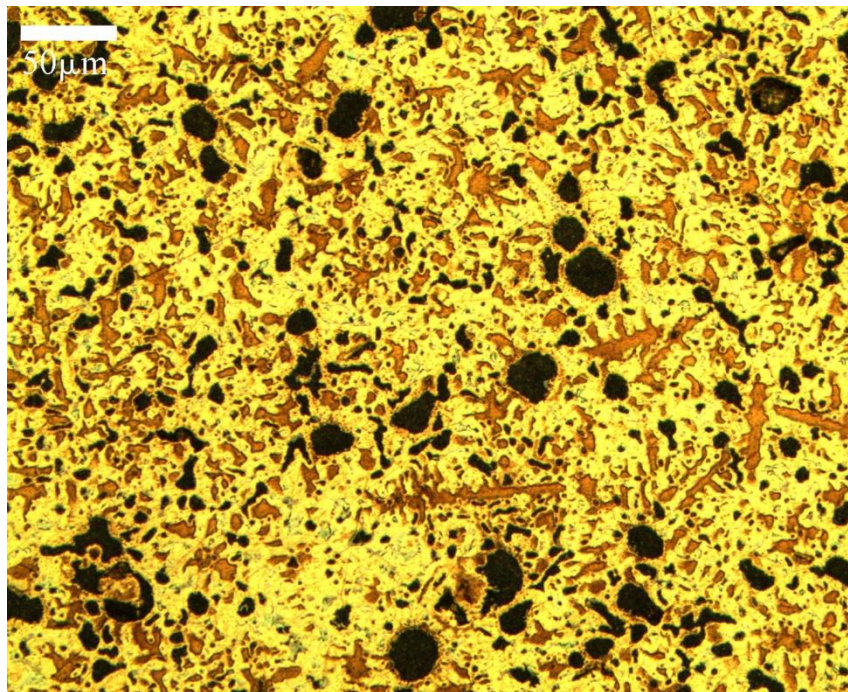


Figure 10 : coupe transversale du collet présentant une structure dendritique. (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3)

Hache fenestrée étroite 8350



Longueur totale: 101 mm	longueur de la fenestrelle interne: non disponible
Longueur du collet : 61 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 12 mm
Ouverture du collet : non disponible	Largeur minimale de l'axe latéral: 12 mm
Epaisseur du collet : 2 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 13 mm
Epaisseur maximale de la lame : 16 mm	Poids : 190 g
longueur de la fenestrelle externe: 30 mm	

Cette hache à été retrouvée dans la levée XVIII du carré 9/11 (Dunand, 1958 ; 727). Elle est associée à un lot contenant deux haches plates allongées. Il manque une grande partie du collet au niveau des axes des fenestrelles. La lame a une face plus bombée que l'autre. La hache est couverte d'une couche de corrosion épaisse, à texture fine et de couleur gris clair. Un échantillon du collet a été prélevé pour observer la tranche perpendiculaire à son axe. L'échantillon étant entièrement corrodé nous n'avons pas pu examiner avec précision sa structure cristalline. Seules quelques dendrites « fantômes » ont pu être discernées (Fig.11). La composition exacte de l'objet n'est pas déterminée. Les analyses EDS ont mis en évidence la présence de cuivre et d'étain.

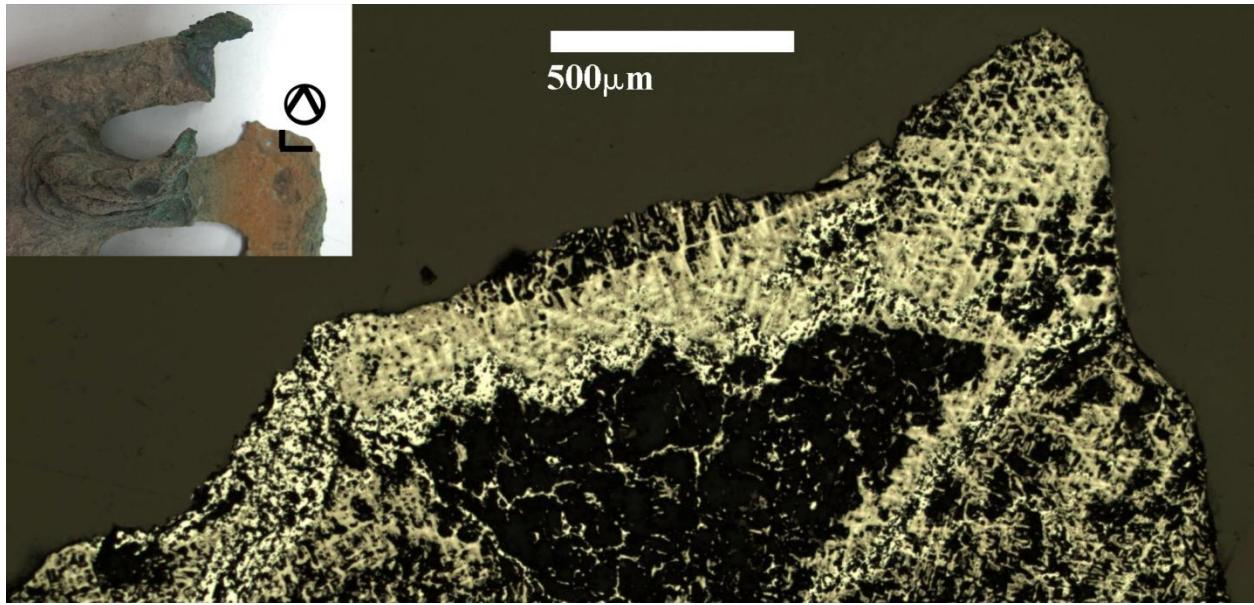


Figure 11 : coupe longitudinale du collet de la hache 8350. Des dendrites corrodées (en clair) sont visible sur la partie supérieure de l'échantillon (Microscope optique en réflexion).

Hache fenestrée étroite 9076



Longueur totale: 101 mm	longueur de la fenestrelle interne: 24 mm
Longueur du collet : 44 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 7 mm
Ouverture du collet : 25 x 14 mm	Largeur minimale de l'axe latéral: 8 mm
Epaisseur du collet : 1 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 13 mm
Epaisseur maximale de la lame : 15 mm	Poids : 173 g
longueur de la fenestrelle externe: 37 mm	

Cette hache a été trouvée dans le *tombeau de particulier n°3* (Montet, 1928 ; 247). Elle possède des fenestrelles ovales et un collet droit. Le collet est plié et cassé au niveau d'une de ses extrémités. L'une des faces de la hache est recouverte d'une corrosion homogène brun sombre. Sur l'autre face cette couche de corrosion est recouverte de plages brun clair. Le collet et une partie des fenestrelles sont recouverts d'une croûte terreuse. Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe du collet. La structure cristalline observée dans l'échantillon est complètement corrodée. Cependant des dendrites « fantômes » (Fig. 12) subsistent ce qui montre que le collet est dans un état brut de fonderie. Cette corrosion a empêché de déterminer la composition exacte de l'objet. Nous avons seulement pu mettre en évidence la présence du cuivre, de l'étain et du plomb.

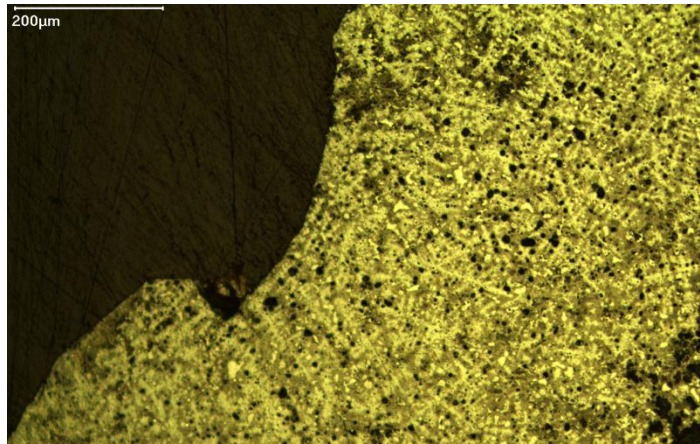


Figure 12 : dendrites fantômes observées dans la coupe du collet corrodé (Microscope optique en réflexion).

Hache fenestrée étroite 10794



Longueur totale: 64 mm	longueur de la fenestrelle interne: 24 mm
Longueur du collet : non disponible	Largeur minimale de l'axe médian: 3 mm
Ouverture du collet : non disponible	Largeur minimale de l'axe latéral: non disponible
Epaisseur du collet : non disponible	Epaisseur maximale de l'axe latéral: non disponible
Epaisseur maximale de la lame : 12 mm	Poids : 47 g
longueur de la fenestrelle externe: non disponible	

Cette hache ne figure pas dans les publications de Dunand, mais elle a été récemment retrouvée avec le matériel de Byblos dans les dépôts de la Direction Générale des Antiquités Libanaise (Gernez, 2007). Son état fragmentaire présentait l'occasion de réaliser plusieurs prélèvements. Il ne subsiste de cette hache que la lame et une partie de l'axe médian. Le tranchant est cassé en plusieurs endroits. Une couche de corrosion particulière de couleur rouge sombre couvre le milieu de la lame. Le reste de la lame est recouvert par une couche de corrosion à texture fine de couleur brun clair. Afin d'observer les coupes de la pointe et du côté de la lame et celle de l'axe de fenestrelles restant, 3 prélèvements ont été faits. Les échantillons sont partiellement consommés par la corrosion. L'axe médian présente une structure dendritique avec des macles mécaniques sur les grains du bord, qui ont probablement été formées lors de la fracture de l'objet ou suite à son polissage. Sur le côté de la lame nous avons pu discerner une structure dendritique. Cet échantillon ne comprend pas la partie tranchante. La pointe de la lame a révélé une structure recristallisée avec des grains équiaxes (Fig. 13 et 14). Ces derniers comprennent des

macles thermiques qui se manifestent par des couples de bandes parallèles ainsi que quelques macles mécaniques. La structure observée résulte d'une ou de plusieurs passes de déformation suivies de recuits. Cependant la dernière action appliquée était une déformation légère. Elle était suffisante pour produire des macles mécaniques mais pas assez forte pour allonger les grains polygonaux (fig.21). L'examen de l'extrémité de la pointe est impossible à cause de la corrosion. Cette partie aurait pu donner des informations importantes sur la dernière déformation, dont la cause pourrait être un affûtage.

L'alliage utilisé est un bronze à 10 Wt.% d'étain. On trouve aussi du plomb sous forme de petits nodules.

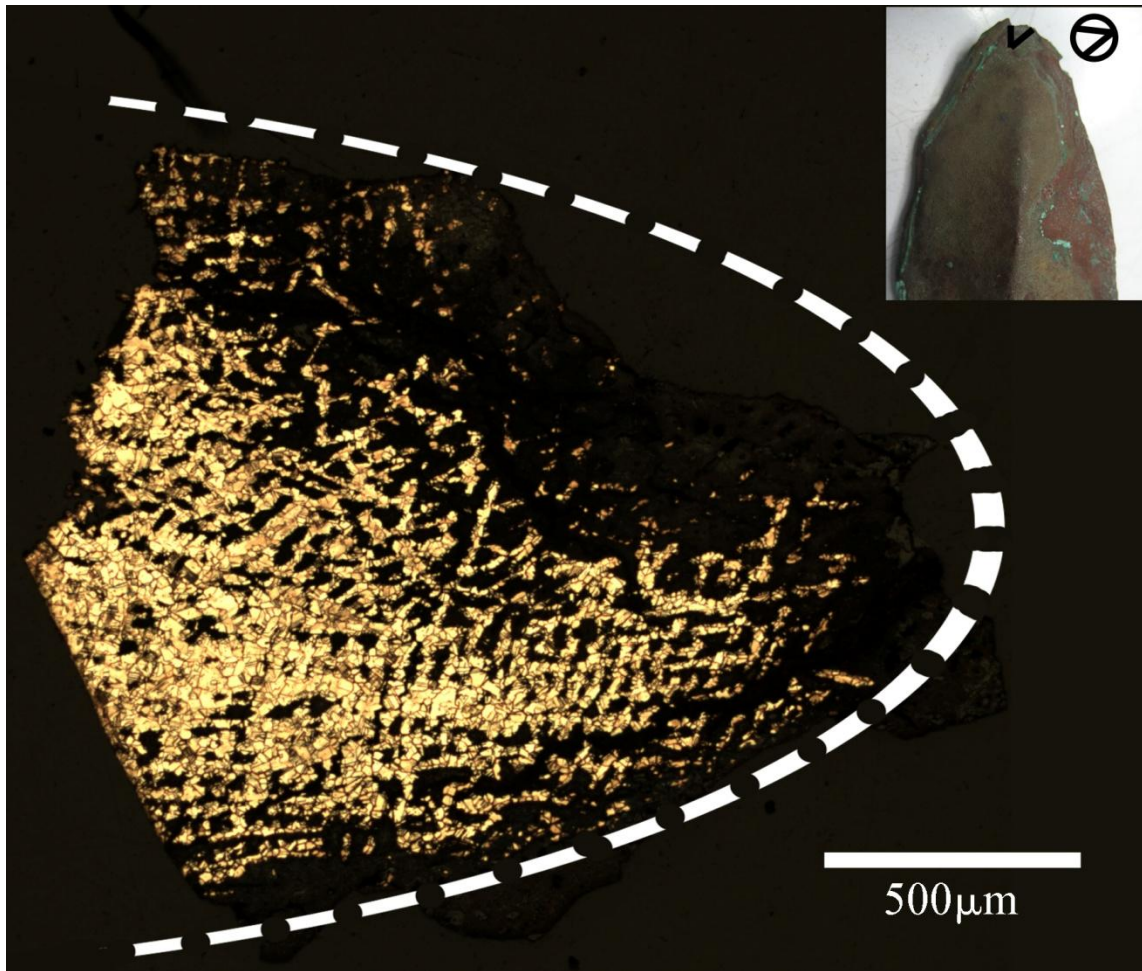


Figure 13 : structure recristallisée de la pointe de la lame (Microscope optique en réflexion, Attaque FeCl_3). La courbe en traits pointillés blancs représente une estimation de la forme de la lame.

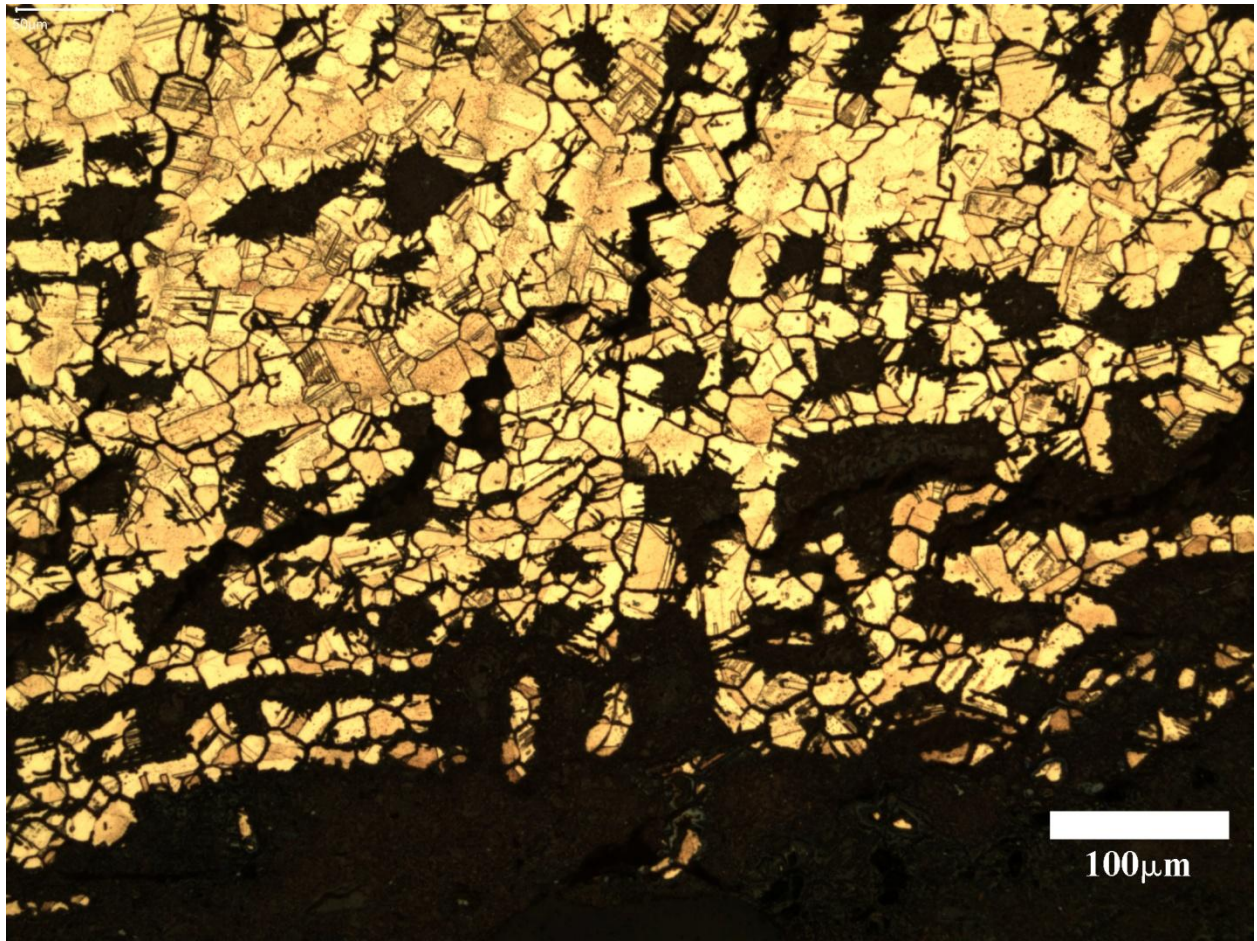


Figure 14 : détail de la partie inférieure de la pointe de la lame : les grains recristallisés sont associés à des macles thermiques et mécaniques (Microscope optique à réflexion, Attaque FeCl_3).

Hache fenestrée étroite 26759



Longueur totale: 123 mm	longueur de la fenestrelle interne: 37 mm
Longueur du collet : 52 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 11 mm
Ouverture du collet : 31 x 12 mm	Largeur minimale de l'axe latéral: 12 mm
Epaisseur du collet : 4 mm (T.C.)	Epaisseur maximale de l'axe latéral: non disponible
Epaisseur maximale de la lame : 34 mm (T.C.)	Poids : 425 g
longueur de la fenestrelle externe: 53 mm	

Cette hache provient de la tombe 14.14 du site d'Arqa (Thalman, 2000 ; 53, Fig. 43). A la suite d'une cassure, une partie du collet est détachée du reste. Egalement, la hache comprend plusieurs fractures causées par la corrosion. Ce phénomène de corrosion a été aggravé par la chaleur émise de la cuisson des céramiques. Par contre, cette chaleur a contribué à préserver une partie du manche à l'intérieur du collet. Le bois carbonisé du manche est plaqué d'une feuille en électrum.

L'observation de la structure cristalline de la hache n'a pas été possible à cause de la corrosion. La composition n'a pas pu être déterminée avec précision. La présence du cuivre et de l'étain a été détectée.

Hache fenestrée étroite 77096



Longueur totale: 121 mm	longueur de la fenestrelle interne: 24 mm
Longueur du collet : 54 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 9 mm
Ouverture du collet : 27 x 16 mm	Largeur minimale de l'axe latéral: 12 mm
Epaisseur du collet : 1 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 18 mm
Epaisseur maximale de la lame : 20 mm	Poids : 262 g
longueur de la fenestrelle externe: 36 mm	

Cette hache a été retrouvée dans la tombe E 304 découverte au site du Yanouh (Monchambert *et al.*, 2010). Le collet est fissuré en plusieurs endroits. Il contient des bouts de bois couvert par une corrosion verte. Les intersections collet/fenestrelles étaient bouchées par du métal. La lame et une partie du collet sont recouvertes d'une couche rugueuse de dépôts foisonnés de couleur vert clair et sombre sur lequel il y a des crêtes, des pores et des croûtes terreuse. La partie restante du collet est recouverte d'une couche fine de corrosion de couleur brun sombre sur un côté et brun rougeâtre clair sur l'autre côté. Un échantillon a été prélevé pour étudier la coupe transversale du collet.

L'échantillon présente des dendrites entourées de ségrégations mineures. Des inclusions de seconde phase (probablement $\alpha+\gamma$) riche en arsenic, des inclusions de sulfure de cuivre et des nodules de plomb ont été détectées dans les espaces inter-dendritiques (Fig. 15).

L'alliage utilisé pour la fabrication de cet objet contient 6 Wt.% d'arsenic et 8 Wt.% de plomb.

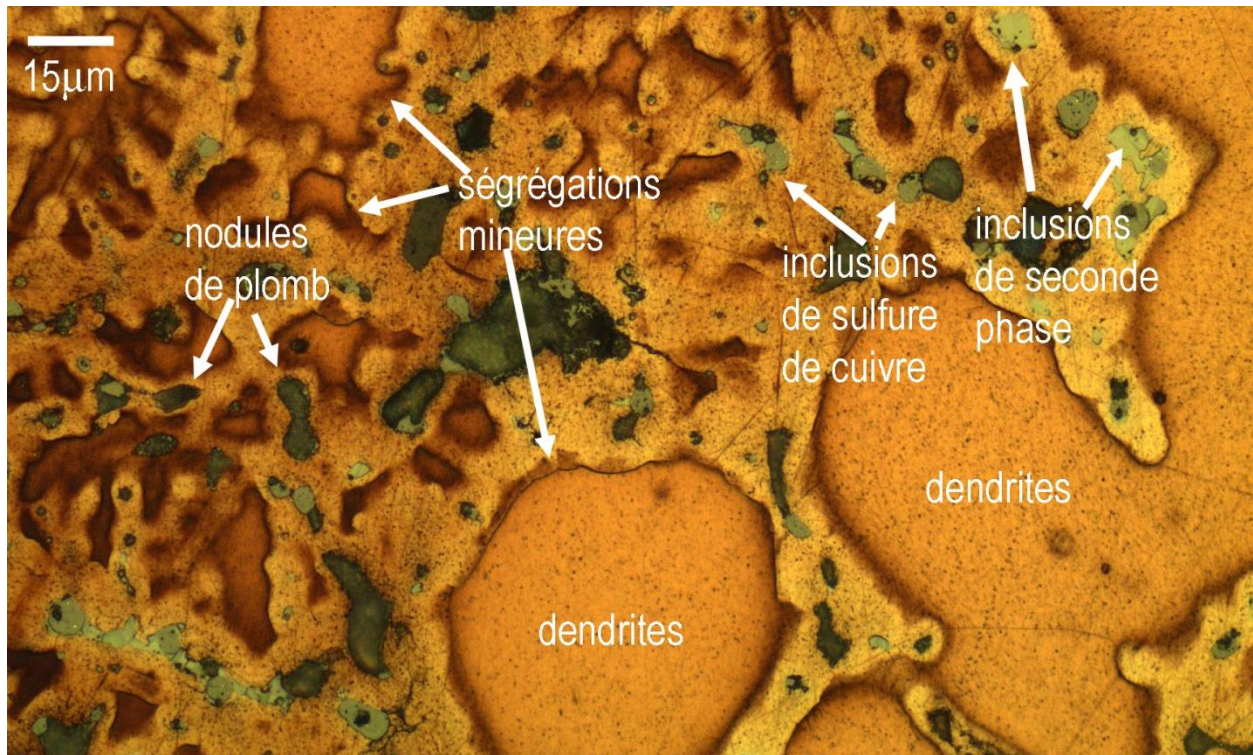


Figure 15 : coupe transversale du collet présentant des dendrites entourées de ségrégations mineures. Nous distinguons dans les espaces inter-dendritiques des inclusions de seconde phase, de sulfures de cuivre et des nodules de plomb (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Haches fenestrées larges

Hache fenestrée large 6320



Longueur totale: 43 mm	longueur de la fenestrelle interne: non disponible
Longueur du collet : non disponible	Largeur minimale de l'axe médian: 11 mm
Ouverture du collet : non disponible	Largeur minimale de l'axe latéral: non disponible
Epaisseur du collet : non disponible	Epaisseur maximale de l'axe latéral: non disponible
Epaisseur maximale de la lame : 4 mm	Poids : 27 g
longueur de la fenestrelle externe: non disponible	

Elle provient de la levée VII du carré 14/22 (Dunand, 1954). Il ne reste de cette hache qu'une partie de la lame et de l'axe médian. Le bon état de conservation du métal nous permet de discerner plusieurs stigmates. Sur la lame ils se manifestent par des filets arborescents et par des ondulations qui rompent l'aspect circulaire du tranchant. Ces derniers indiquent que le métal n'a pas rempli toute l'empreinte du moule. Ce phénomène est causé par le retrait du métal suite à un refroidissement rapide dû à la différence de température entre le métal en fusion et le moule.

L'observation microscopique d'une tranche de l'axe médian montre que l'objet présente une structure dendritique, avec des formations de seconde phase et des inclusions de sulfure de cuivre circulaires. La tranche de la lame présente une irrégularité au niveau de la surface, probablement due aux crevasses et aux empreintes de gerces. La lame présente également une structure dendritique avec des formations de seconde phase et des inclusions circulaires de sulfure de cuivre. Sa surface est marquée par des macles mécaniques qui sont probablement causées par la cassure. Le tranchant est dans un état

légèrement écroui, plus particulièrement au niveau de sa pointe (Fig. 1). Il se manifeste par des macles mécaniques, des inclusions de sulfure de cuivre allongées et par quelques dendrites déformées ou « fibreuses ». Tous ces indices suggèrent que l'objet avait été prêt à l'utilisation en dépit de l'état de surface de la lame.

L'alliage formant l'objet est un bronze composé de 93% de cuivre et 6,5% d'étain.

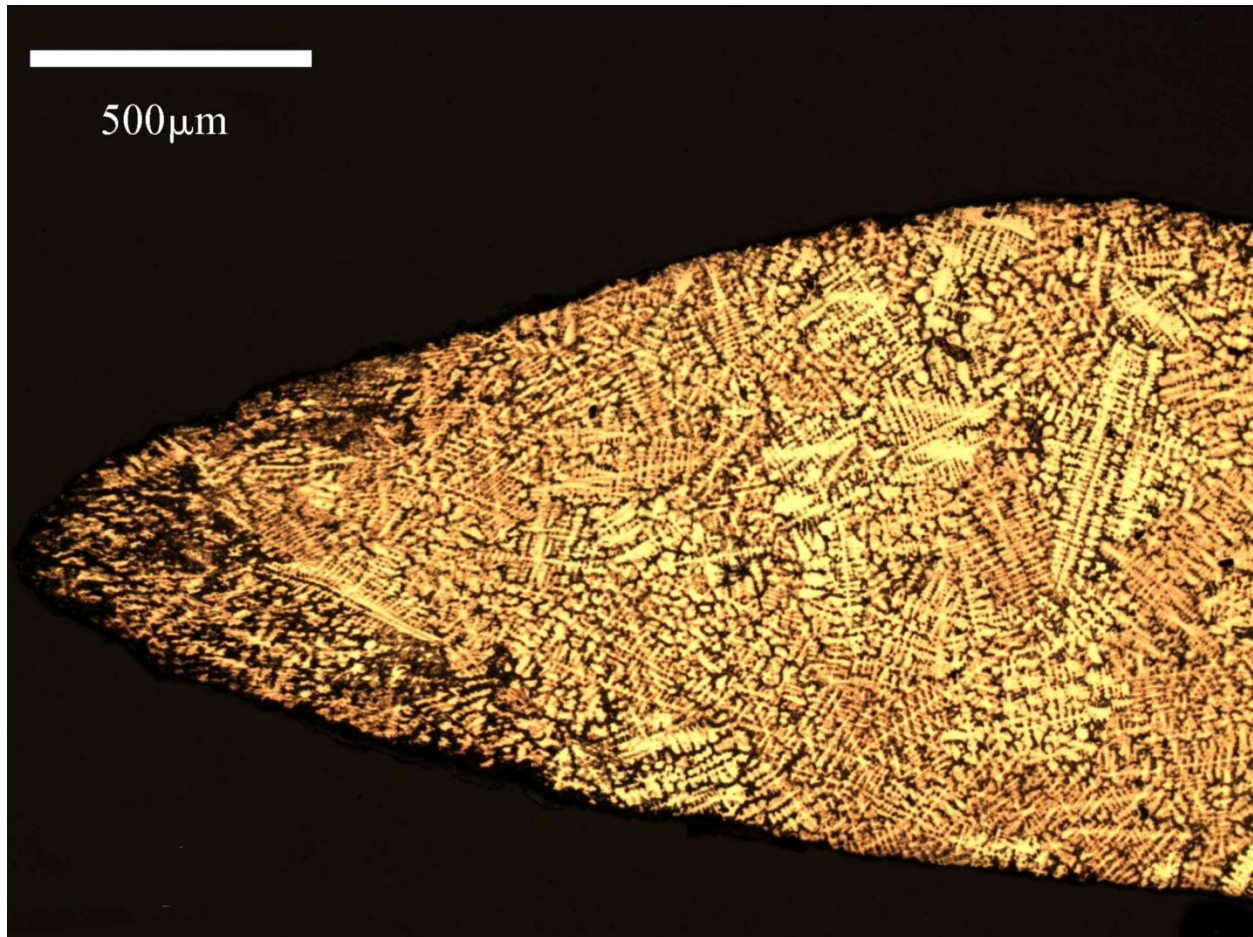


Figure 1: microstructure du tranchant et d'une partie de la lame. Le tranchant présente un état écroui tandis que la lame est en état brut de fonderie. (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Hache fenestrée large 10998



Longueur totale: 72 mm	longueur de la fenestrelle interne: 43 mm
Longueur du collet : 118 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 13 mm
Ouverture du collet : 28 x21mm et 21 x 18 mm	Largeur minimale de l'axe latéral: 10 mm
Epaisseur du collet : 1 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 7 mm
Epaisseur maximale de la lame : 5 mm	Poids : 112 g
longueur de la fenestrelle externe: 44 mm	

Cette hache a été trouvée dans le dépôt χ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 341). Son axe médian est fissuré en son milieu. Elle a subi plusieurs dégâts au niveau du collet : une déformation due à un écrasement sur l'une des ouvertures du collet et une cassure sur l'autre ouverture ayant causé la perte d'une partie de l'objet. Le bout restant du côté de l'axe latéral est replié vers l'extérieur. Elle est couverte par une couche de corrosion à texture relativement fine de couleur vert sombre. Elle présente occasionnellement des croûtes terreuses et des bubons.

l'examen du prélèvement « 1 », révèle une structure dendritique avec quelques macles mécaniques, des inclusions de sulfure de cuivre de forme circulaire et des formations de seconde phase ($\alpha+\delta$). Sur le prélèvement « 2 » on observe une structure dendritique entourée de macles mécaniques. On trouve également des formations de seconde phase et des inclusions de sulfure de cuivre circulaires. Sur une partie de la tranche qui correspond à l'extrémité du collet on trouve des petits grains recristallisés sur la surface. Ils sont suivis vers l'intérieur par des macles mécaniques (Fig.2). La forme circulaire des inclusions de sulfure de cuivre et des pores éliminent la possibilité d'une déformation importante sur

l'ensemble de cette partie du collet. La présence de petits grains recristallisés renvoie à une exposition à un recuit, qui pourrait être le résultat d'un traitement thermique lié à un travail de finition, à une cassure intentionnelle ou à un accident. On suppose que sur les autres côtés cette recristallisation n'a pas pu être observée à cause de l'attaque de la corrosion qui a éliminé cette fine couche de grains. Il est probable qu'une partie des macles mécaniques résulte de la pression exercée lors de la cassure.

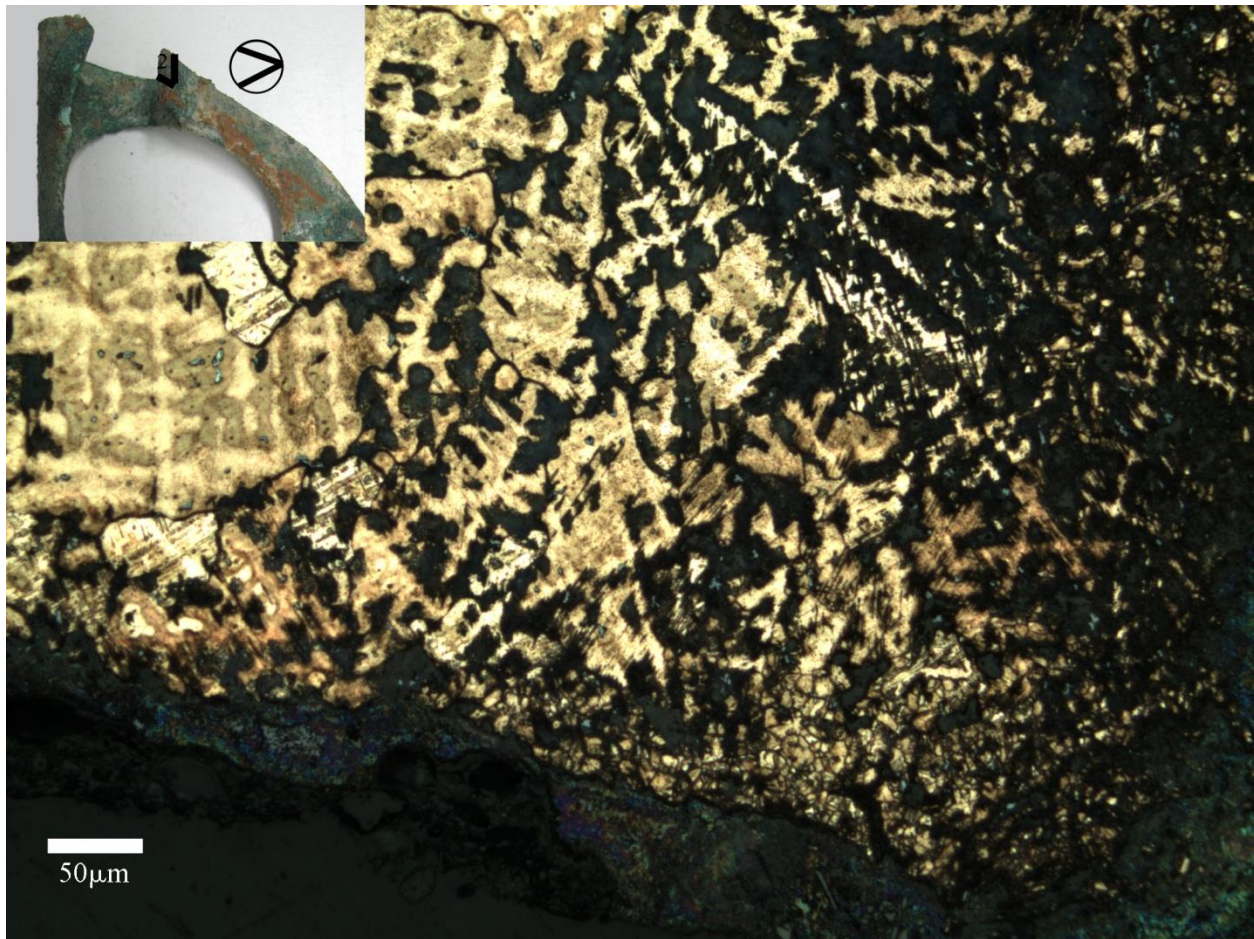


Figure 2: coupe transversale du collet (2). Nous distinguons une structure dendritique au centre suivie par des macles mécaniques et ensuite par des petits grains recristallisés à la surface (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Hache fenestrée large 11655



Longueur totale: 79 mm	longueur de la fenestrelle interne: 37 mm
Longueur du collet : 99 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 15 mm
Ouverture du collet : 31 x20mm et 27 x 15 mm	Largeur minimale de l'axe latéral: 11 mm
Epaisseur du collet : 0.7 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 10 mm
Epaisseur maximale de la lame : 7 mm	Poids : 132 g
longueur de la fenestrelle externe: 39 mm	

Cette hache a été trouvée dans le dépôt ε du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 219-220). Elle présente un collet incurvé. La « pointe » de la lame est plate et ne comporte pas de tranchant. Elle n'a probablement pas été amincie après la coupure de l'entonnoir de coulée. La lame présente quelques dissymétries ainsi que des petites ondulations dans divers endroits. Plusieurs zones du collet comportent de larges trous. Tous ces indices peuvent indiquer que le moulage était raté là où le métal n'aurait pas pu bien remplir des parties nécessaires au bon fonctionnement de l'arme comme le collet. La hache est recouverte d'une corrosion de couleur brun sombre. Les deux faces de la lame sont atteintes d'une corrosion locale constituée de piqûres et de patelles. Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe du collet.

Le collet (Fig. 4) présente une structure dendritique et des formations de seconde phase. Il a été lissé (Fig. 5), probablement suite à un polissage, ce qui a éliminé les trous de fonderie de la surface. L'alliage utilisé pour la fabrication de cette arme est un cuivre à 3% d'arsenic.



Figure 3 : hache fenestrée large 11655 présentant une pointe plate.

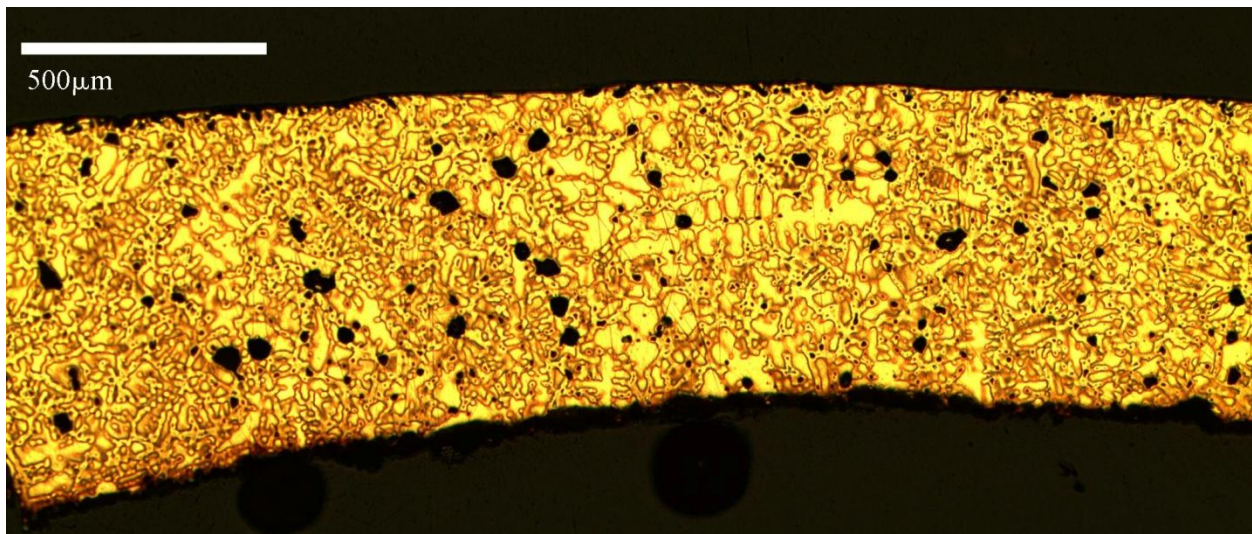


Figure 4 : coupe longitudinale du collet présentant une structure dendritique (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

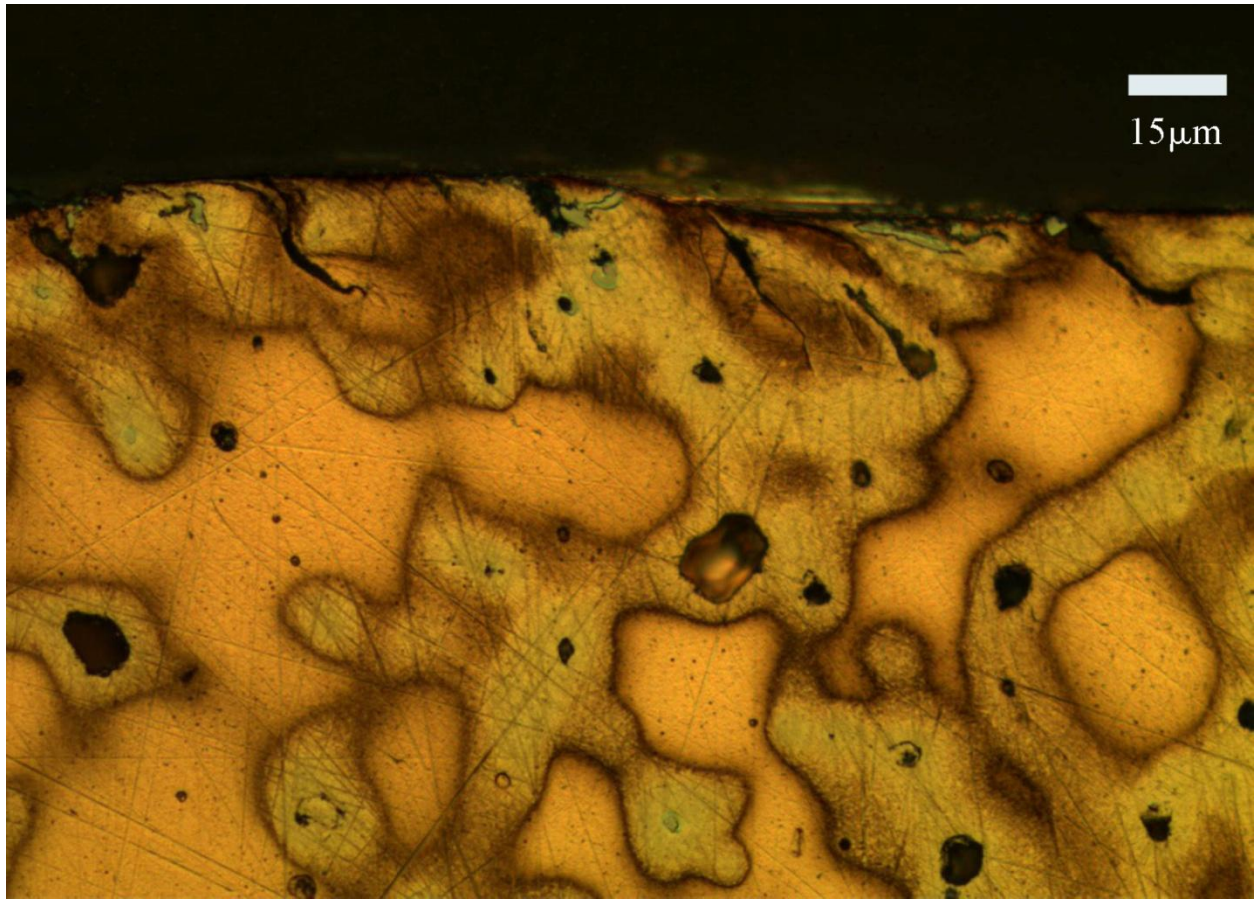


Figure 5 : détail de coupe longitudinale (fig. 4) du collet présentant une surface lissée avec des trous écrasés (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Hache fenestrée large 11656



Longueur totale: 83 mm	longueur de la fenestrelle interne: 37 mm
Longueur du collet : 100 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 17 mm
Ouverture du collet : 27 x16 mm et 21 x 12 mm	Largeur minimale de l'axe latéral: 15 mm
Epaisseur du collet : 1.2 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 8 mm
Epaisseur maximale de la lame : 8 mm	Poids : 211 g
longueur de la fenestrelle externe: 37 mm	

Cette hache a été trouvée dans le dépôt ϵ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 219-220). Elle présente un collet incurvé et des fenestrelles ovales. Le collet contient des restes de bois du manche. La hache est recouverte d'une corrosion homogène de texture fine et de couleur gris sombre. Sur l'une de ces 2 faces nous observons une croûte terreuse verte localisée sur une partie de la lame et du collet. Sur l'autre face nous observons sur les mêmes parties de croûtes de couleur brun-gris clair. Les couches de corrosion ont empêché l'étude d'éventuels stigmates de fabrication ou d'utilisation. Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe du collet.

Le collet présente une structure dendritique biphasée (Fig. 6). Le métal utilisé est un cuivre à 5% d'arsenic.

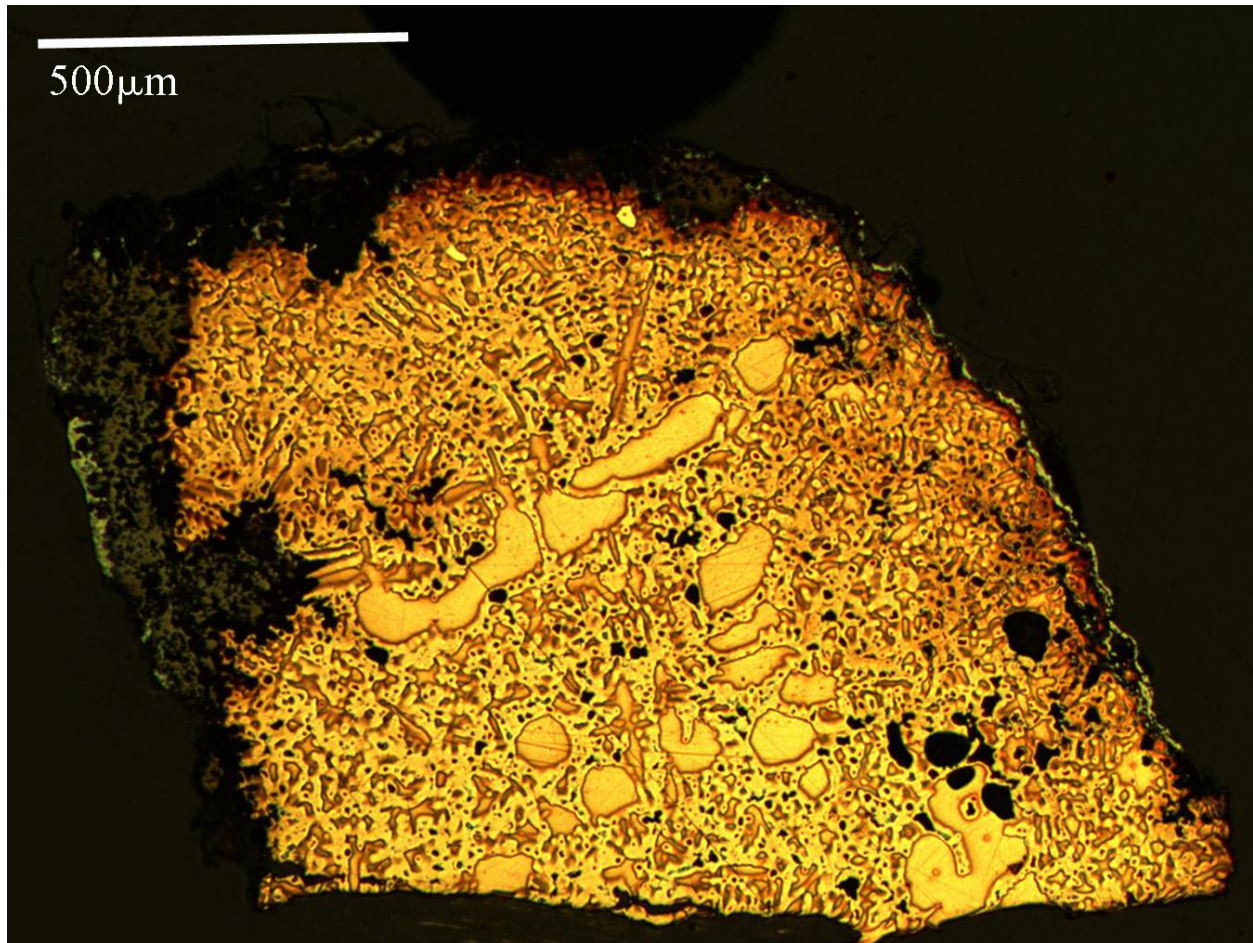


Figure 6 : coupe transversale du collet présentant une structure dendritique (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Hache fenestrée large 11658



Longueur totale: 77 mm	longueur de la fenestrelle interne: 36 mm
Longueur du collet : 108 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 18 mm
Ouverture du collet : 32 x 24 mm et 25 x 14 mm	Largeur minimale de l'axe latéral: 13 mm
Epaisseur du collet : 1.2 mm	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 9 mm
Epaisseur maximale de la lame : 8 mm	Poids : 177 g
longueur de la fenestrelle externe: 36 mm	

Cette hache a été trouvée dans le dépôt ε du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 219-220). Elle a un collet incurvé, une lame à section ovale et des fenestrelles ovales. Une concavité rompt la courbe de la pointe de lame. Celle-ci présente à sa base deux angles aigus qui pourraient évoquer des entailles sur le tranchant dues à l'utilisation. Cependant l'absence de bourrelets autour de ces défauts anguleux et la régularité de la courbe du tranchant nous empêche de confirmer ce propos. Nous pensons que suite au martelage du tranchant un défaut de fonderie a pu causer cette forme. La hache est recouverte d'une couche corrosion homogène de texture fine et de couleur gris sombre. L'une de ses faces présente une couche épaisse de croûte terreuse. Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe du collet.

Le collet présente une structure dendritique biphasée. Le métal utilisé est un cuivre à 3% d'arsenic.

Hache fenestrée large 11708



Longueur totale: 83 mm	longueur de la fenestrelle interne: 35 mm
Longueur du collet : 91 mm	Largeur minimale de l'axe médian: 16 mm
Ouverture du collet : 21 x 14 mm	Largeur minimale de l'axe latéral: 15 mm
Epaisseur du collet : 2 mm (T.C.)	Epaisseur maximale de l'axe latéral: 11 mm
Epaisseur maximale de la lame : 8 mm (T.C.)	Poids : 157 g
longueur de la fenestrelle externe: 35 mm	

Trouvée dans le dépôt o du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 343), elle est couverte d'une couche épaisse de corrosion de couleur vert sombre, masquant de probables stigmates de fabrication ou des traces d'utilisation. Il manque une grande partie du collet et de la lame. Pour observer la tranche de la lame, un prélèvement a été fait sur son côté cassé. Une petite quantité de métal sain au centre de l'échantillon révèle une structure dendritique avec des inclusions de sulfure de cuivre, des formations de seconde phase et quelques macles mécaniques. L'alliage utilisé est un bronze d'environ 87% de cuivre et 12% d'étain.

Poignards à lame simple

Poignard à lame simple 10293



Longueur totale : 188 mm	Diamètre du trou de rivet : 4 mm
Longueur de la lame : 160 mm	Longueur du rivet :
Largeur maximale de la lame : 42 mm	Diamètre du fût de rivet :
Épaisseur maximale de la lame: 4 mm	Diamètre de la tête du rivet :
Épaisseur minimale de la languette: 1 mm	Poids : 66 g

Ce poignard a été trouvé dans le dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 188). La languette à une forme irrégulière à cause d'une perte de métal liée à l'élimination de la corrosion par l'acide. Elle ne comporte aucun rivet. L'arme est recouverte d'une couche de corrosion fine et homogène. Celle-ci est associée à de nombreuses piqûres éparpillées sur l'ensemble de l'objet. Des stries parallèles à l'axe de l'arme sont observées sur la lame. Elles ont probablement été créées par le polissage de l'objet au cours des travaux de finissages. La pointe de la lame est bien aiguisée. Un échantillon a été prélevé de la languette pour étudier la coupe transversale de la languette.

L'échantillon présente des grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques, des inclusions de sulfure de cuivre allongées, des pores et quelques nodules de plomb. Le métal utilisé pour la fabrication de ce poignard est un cuivre à 7 Wt.% d'arsenic.

Poignard à lame simple 11661



Longueur totale : 232 mm	Diamètre du trou de rivet :
Longueur de la lame : 200 mm	Longueur du rivet : 12 mm
Largeur maximale de la lame : 46 mm	Diamètre du fût de rivet : 4 mm
Épaisseur maximale de la lame : 5 mm	Diamètre de la tête du rivet :
Épaisseur minimale de la languette : 1 mm	Poids : 87 g

Ce poignard a été trouvé dans le dépôt o du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 341). Une grande partie de sa languette manque ce qui fait qu'un seul rivet subsiste. L'arme est recouverte d'une corrosion de couleur gris sombre et vert clair associée à des croûtes vertes et des bubons. Deux échantillons ont été prélevés pour observer les coupes du rivet (Fig. 1) et de la languette.

L'état corrodé de l'échantillon prélevé de la languette a rendu difficile l'étude de la structure cristalline de cette partie de l'objet. Une attaque au FeCl_3 était alors impossible car elle aurait détruit ce qui reste du métal sain. Cependant nous avons réussi à détecter des inclusions de sulfure de cuivre allongées révélant ainsi que cette la déformation de cette zone. Le fût du rivet est dans un état recristallisé avec des grains polygonaux de dimensions réduites ($<20 \mu\text{m}$) et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. L'observation des deux coupes du rivet montre que les inclusions de sulfure de cuivre de la zone du fût suivent la direction de l'axe du rivet (Fig. 2). La corrosion a empêché l'étude de la tête du rivet.

Le métal utilisé pour la fabrication du poignard est un cuivre à 6 Wt.% d'arsenic. Celui utilisé pour la fabrication du rivet est un cuivre à 2 Wt.% d'arsenic avec 1 Wt.% d'impuretés de soufre et de fer.

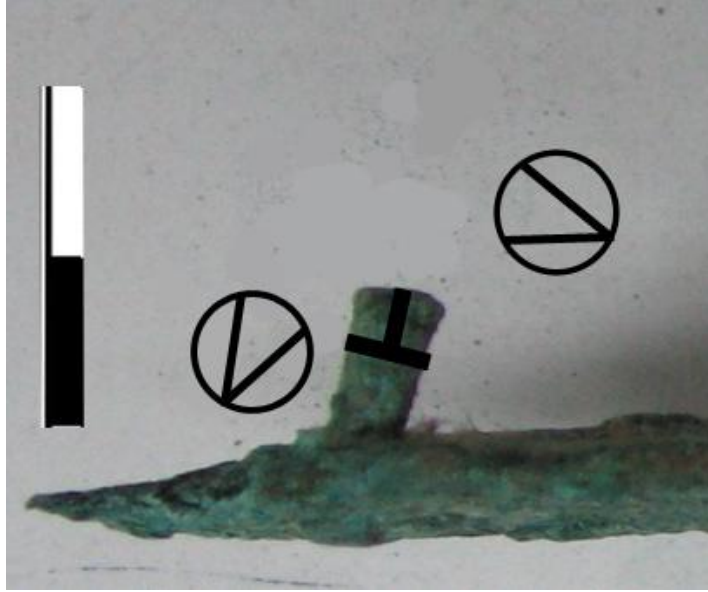


Figure 1 : illustration montrant l'échantillon prélevé du rivet avec la direction d'observation de ses coupes.

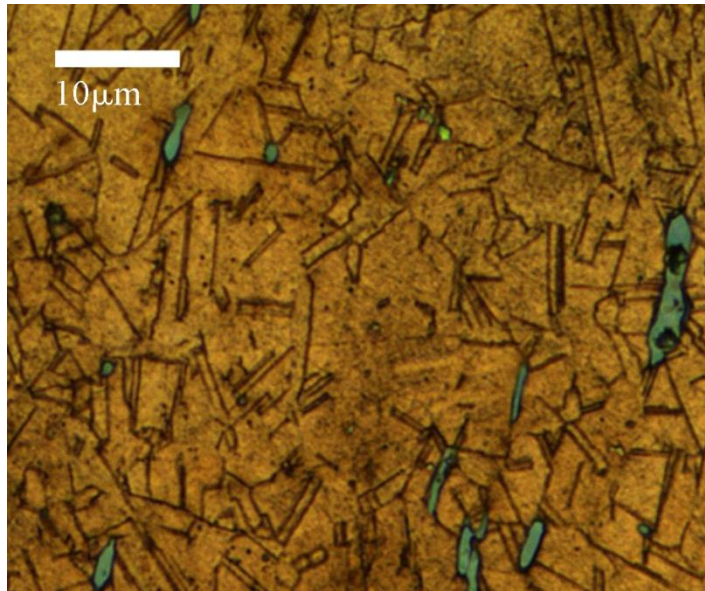


Figure 2 : coupe longitudinale du rivet présentant une structure recristallisée avec des inclusions de sulfure de cuivre allongées Microscope optique en réflexion, attaque acide FeCl_3).

Poignard à lame simple 11671



Longueur totale : 170 mm	Diamètre du trou de rivet :
Longueur de la lame : 149 mm	Longueur du rivet : 10 mm
Largeur maximale de la lame : 37 mm	Diamètre du fût de rivet : 4 mm
Épaisseur maximale de la lame : 4 mm	Diamètre de la tête du rivet :
Épaisseur minimale de la languette : 1 mm	Poids : 49 g

Ce poignard a été trouvé dans le dépôt o du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 341). Des traces de bois préservé par la corrosion, sont présentes sur une face de la languette. L'arme est recouverte d'une corrosion de couleur gris sombre. Celle-ci est associée à des croûtes vertes et grises et des bubons. La lame comporte quelques cassures liées à la fragilisation du tranchant par la corrosion. Un échantillon a été prélevé du rivet pour observer sa section transversale et longitudinale, un autre échantillon a été pris pour observer la coupe du tranchant.

L'observation de la coupe de la lame a révélé plusieurs fissurations qui sont probablement liées à un mécanisme de corrosion (Fig.3). Plusieurs types d'inclusions sont présents : des inclusions de sulfure de cuivre, des nodules de plomb dans la matrice de métal sain, des nodules de cuivre non allié et des nodules d'argent dans les fissures. Ce dernier type a probablement été formé durant l'enfouissement de l'objet. Les inclusions de sulfure de cuivre (Fig. 4) et les nodules de plomb sont allongés. La structure cristalline présente de grains polygonaux allongés et une grande quantité de macles mécaniques. Le fût du rivet présente une structure recristallisée avec des grains polygonaux de dimensions réduites. Les inclusions de sulfure de cuivre sont allongées dans le sens de l'axe long du rivet (Fig.5). La tête du rivet n'a pas pu être observée à cause de la corrosion.

Le métal utilisé dans ce poignard est un cuivre à 3 Wt.% d'arsenic, il contient aussi 1 Wt.% de fer. Le rivet est fait à partir d'un cuivre à 2 Wt.% d'arsenic avec 1 Wt.% de Fer.

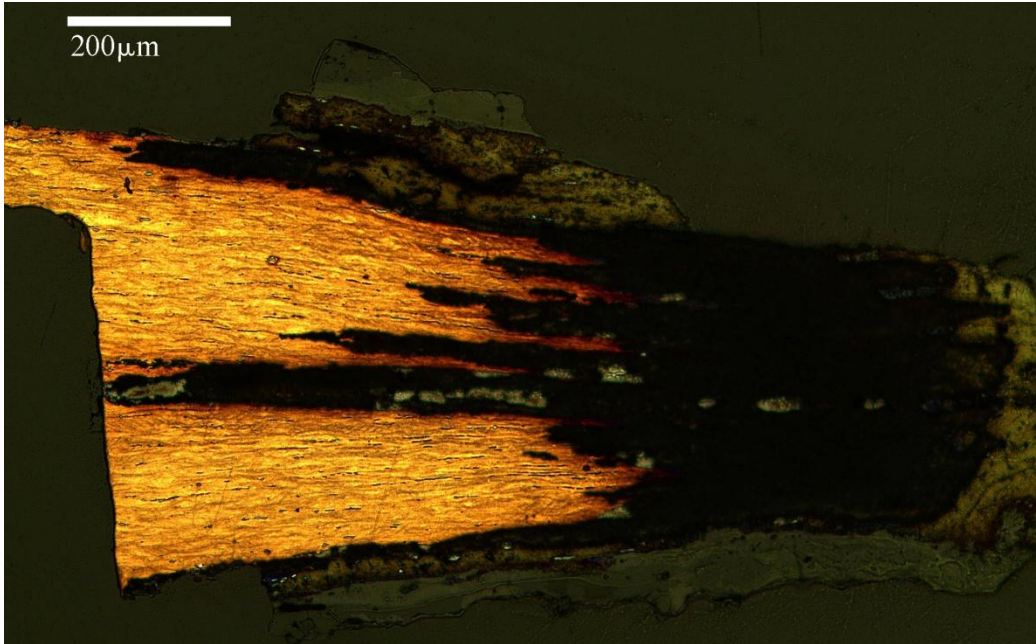


Figure 3 : coupe transversale du tranchant présentant plusieurs fissures qui peuvent être dues à des mécanismes de corrosion (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

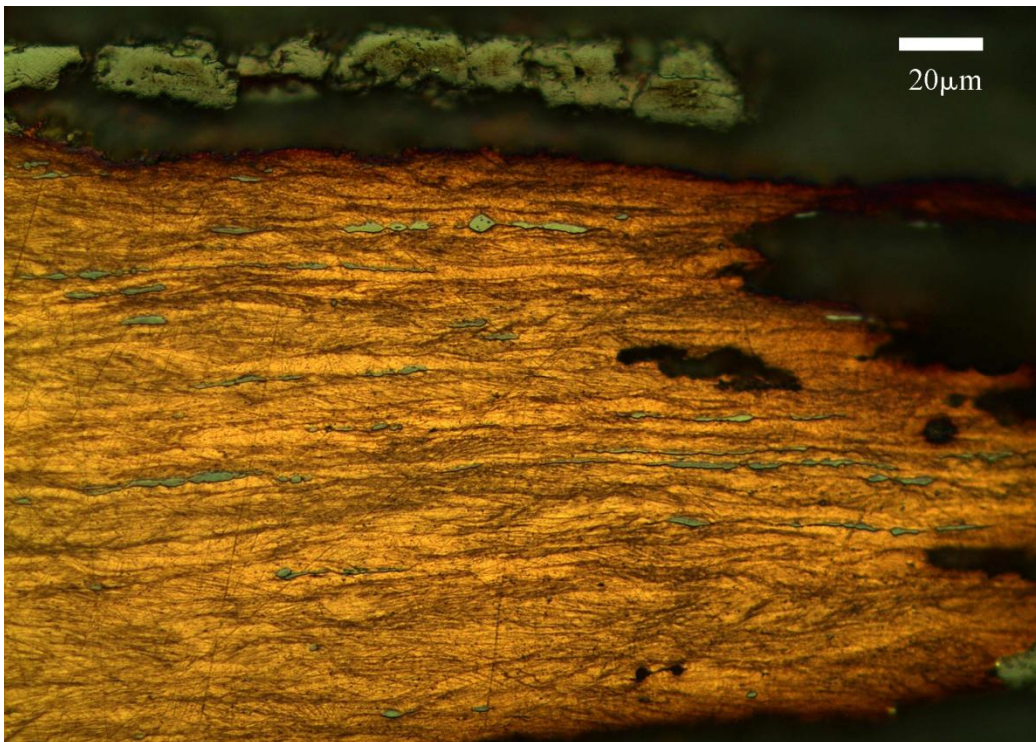


Figure 4 : détail de la microstructure de la lame. La présence de macles mécaniques, de grains polygonaux écrouis et des inclusions de sulfure de cuivre (en gris foncé et clair) allongées est attestée (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

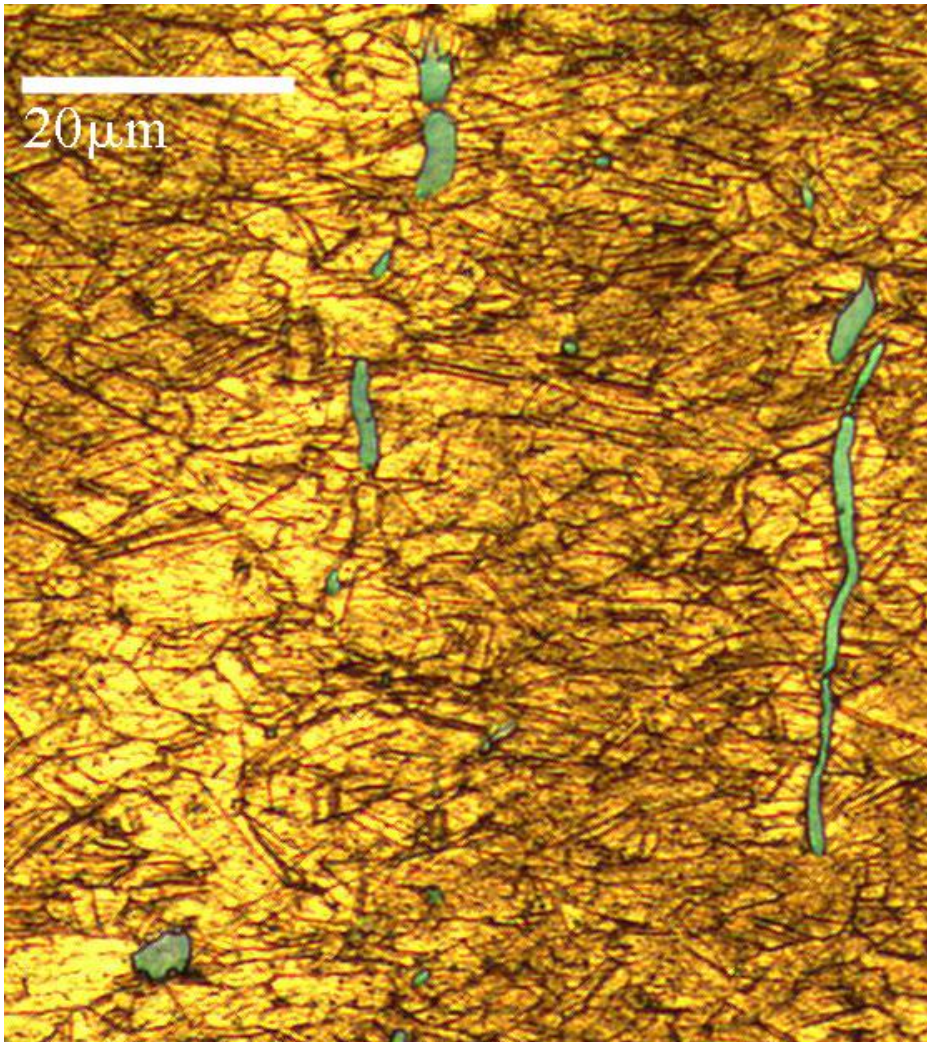


Figure 5 : coupe longitudinale du rivet présentant une structure recristallisée du rivet avec des inclusions de sulfure de cuivre allongées. (Microscope optique en réflexion, attaque acide FeCl_3).

Poignard à lame simple 11686



Longueur totale : 203 mm	Diamètre du trou de rivet :
Longueur de la lame : 174 mm	Longueur du rivet : 11 et 13 mm
Largeur maximale de la lame : 42 mm	Diamètre du fût de rivet : 2.5 mm
Épaisseur maximale de la lame : 5 mm	Diamètre de la tête du rivet : 3 mm
Épaisseur minimale de la languette : 1 mm	Poids : 65 g

Cette arme provient du dépôt o du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 341). Elle présente deux rivets non alignés. Ceci est assez inhabituel étant donné que ce type de poignard est généralement fixé par 3 rivets. Il est possible que le troisième rivet ait été enlevé et qu'ensuite son trou ait été bouché par la corrosion. La lame présente deux rainures de part et d'autre de la nervure. Elle est recouverte d'une couche homogène de corrosion de couleur gris sombre. La languette est recouverte d'une corrosion de couleur vert sombre et brun clair. Elle présente des crêtes de couleur vert clair et des croûtes terreuses. Un échantillon a été prélevé de la partie inférieure de la lame pour observer sa coupe.

L'échantillon (Fig. 6) présente des grains polygonaux allongés associés à des macles mécaniques ainsi que des inclusions de sulfure de cuivre et des nodules de plomb allongés. Cependant cette partie de l'objet qui correspond au tranchant n'est pas pointue.

L'alliage utilisé pour la fabrication de cette arme est bronze à 10 Wt.% d'étain. Il contient également 1 Wt.% d'arsenic.

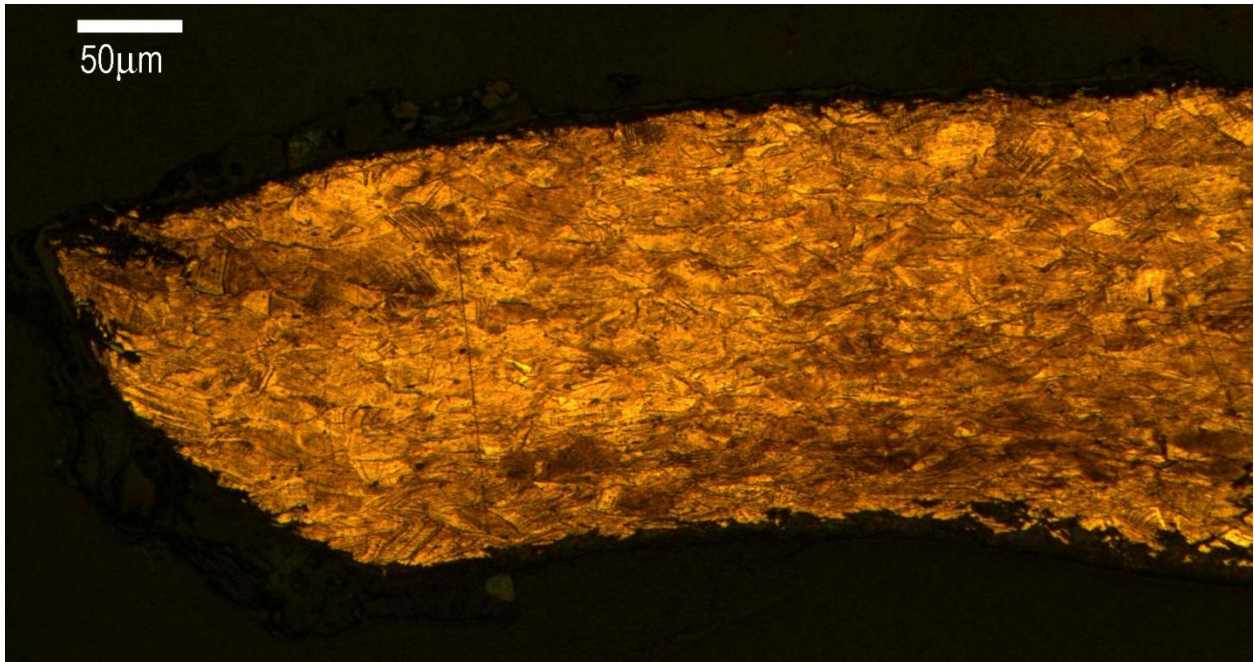


Figure 6 : coupe du tranchant de la partie inférieure de la lame présentant un état écroui (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Poignard à lame simple 11697



Longueur totale : 145 mm	Diamètre du trou de rivet :
Longueur de la lame : 116 mm	Longueur du rivet : 11 mm
Largeur maximale de la lame : 39 mm	Diamètre du fût de rivet : 3 mm
Epaisseur maximale de la lame: 4 mm	Diamètre de la tête du rivet :
Epaisseur minimale de la languette: 2 mm	Poids : 47 g

Cette arme provient du dépôt o du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 341). Elle diffère des deux derniers poignards par la présence d'un seul rivet tandis que les autres poignards devaient en avoir trois. La pointe de la lame et une partie de la languette manquent. L'une des deux faces de l'arme est recouverte d'une corrosion. Sur une face la couleur de corrosion dominante est le gris sombre, sur l'autre face c'est le vert sombre. Nous observons sur l'ensemble de l'objet des croûtes de dimensions importantes. Un échantillon a été prélevé dans le rivet pour observer les sections transversale et longitudinale, un autre échantillon a été pris pour observer une coupe de la lame.

La lame est dans un état écroui (Fig. 7 et 8). Elle présente des grains polygonaux allongés et des macles mécaniques. Les inclusions de sulfure de cuivre sont également allongées. Bien que le rivet soit en partie corrodé nous avons pu discerner des similitudes entre la structure cristalline de son fût et celle des rivets 11661(10142) 11671(10122). Il présente une structure recristallisée avec des grains polygonaux de dimensions réduites. Les inclusions de sulfure de cuivre sont allongées dans le sens de l'axe.

Le métal utilisé pour la fabrication de ce poignard est un cuivre à 3 Wt.% d'arsenic et 3 Wt.% d'étain.. Le rivet est fait à partir d'un cuivre à 2 Wt.% d'arsenic ainsi que 1 Wt.% de fer.

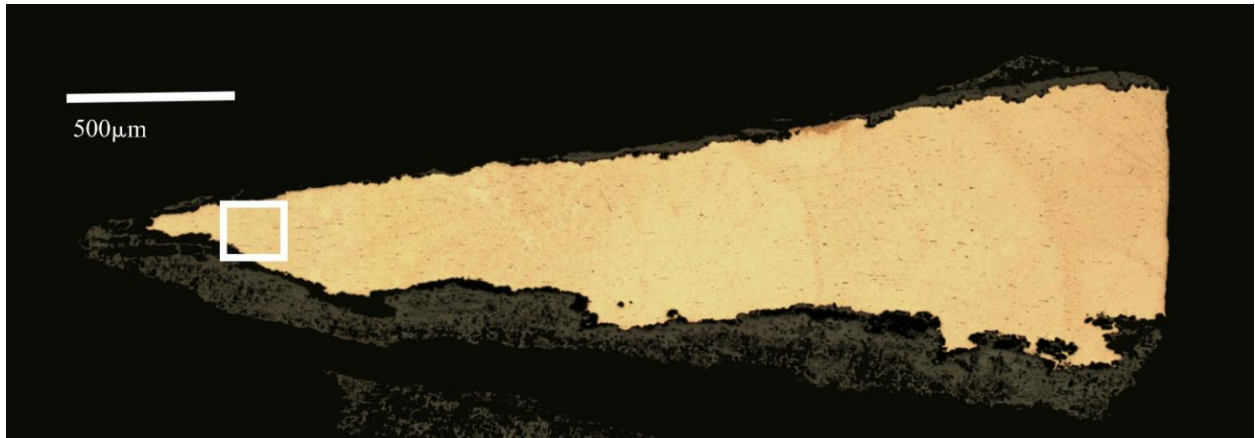


Figure 7 : coupe du tranchant de la lame (Microscope optique en réflexion).

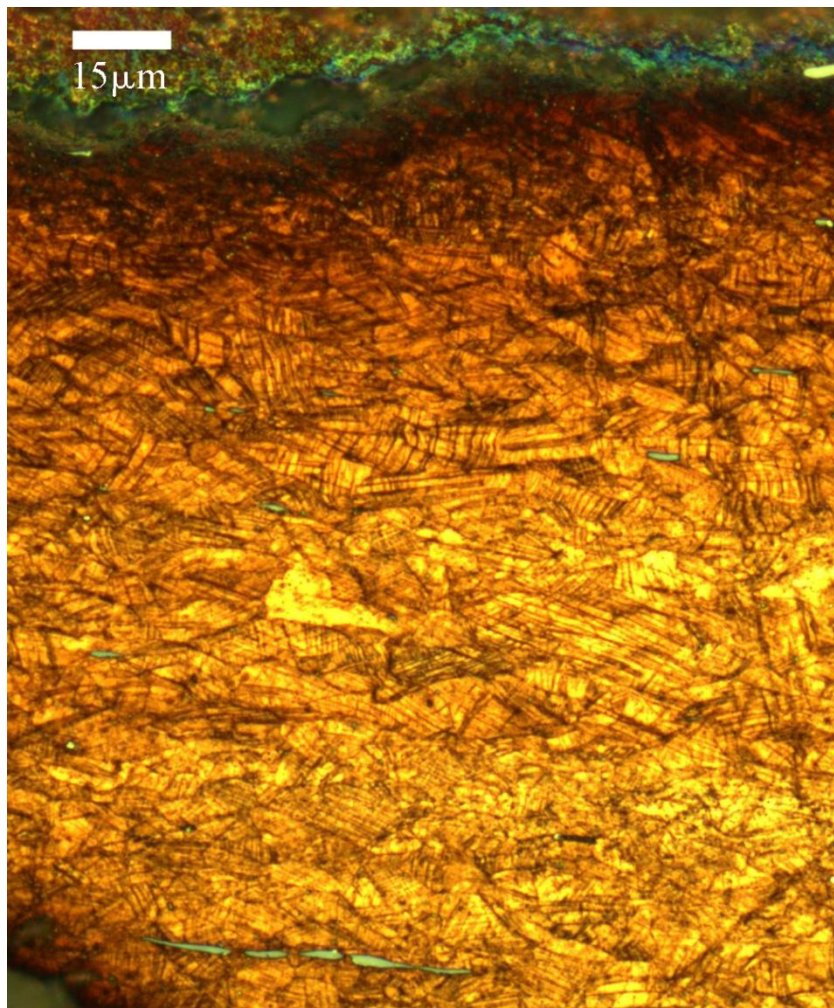


Figure 8: détail de la partie encadrée en blanc (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3) de la coupe de la lame présentant des grains polygonaux allongés, des macles mécaniques et des inclusions de sulfures de cuivre allongées (en couleur gris bleuâtre).

Poignard à lame simple 11854



Longueur totale : 202 mm	Diamètre du trou de rivet : 4 mm
Longueur de la lame : 179 mm	Longueur du rivet : 13 mm
Largeur maximale de la lame : 34 mm	Diamètre du fût de rivet : 3 mm
Épaisseur maximale de la lame : 4 mm	Diamètre de la tête du rivet :
Épaisseur minimale de la languette : 1 mm	Poids : 48 g

Ce poignard a été trouvé dans le dépôt I du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 292 ; Fig. 321). L'arme a conservé un de ces trois rivets. Deux cassures ont été observées au niveau de la languette. L'arme est recouverte d'une corrosion de couleurs gris clair, gris sombre, vert clair et vert sombre. Cette couche de corrosion présente également des crêtes, des bubons et des croûtes terreuses. Un échantillon a été prélevé de la languette pour observer la coupe transversale du bord d'un trou de rivet.

L'échantillon présente une structure recristallisée caractérisée par des grains polygonaux équiaxes et des inclusions de sulfure de cuivre allongées et horizontales. Le profil du bord du trou de rivet présente un aspect évasé (Fig. 9). A ce niveau l'élongation des inclusions de sulfure de cuivre (Fig. 10) et des grains suit l'évolution du profil du bord du trou. Les grains de cette zone sont allongés et présentent des macles mécaniques. Cette structure est liée au perçage du trou ou à l'application du rivet.

Le métal utilisé pour la fabrication de ce poignard est cuivre à 1.3 Wt.% d'arsenic. Il contient également 1 Wt.% de fer et aux alentours de 0.5 Wt.% de soufre.

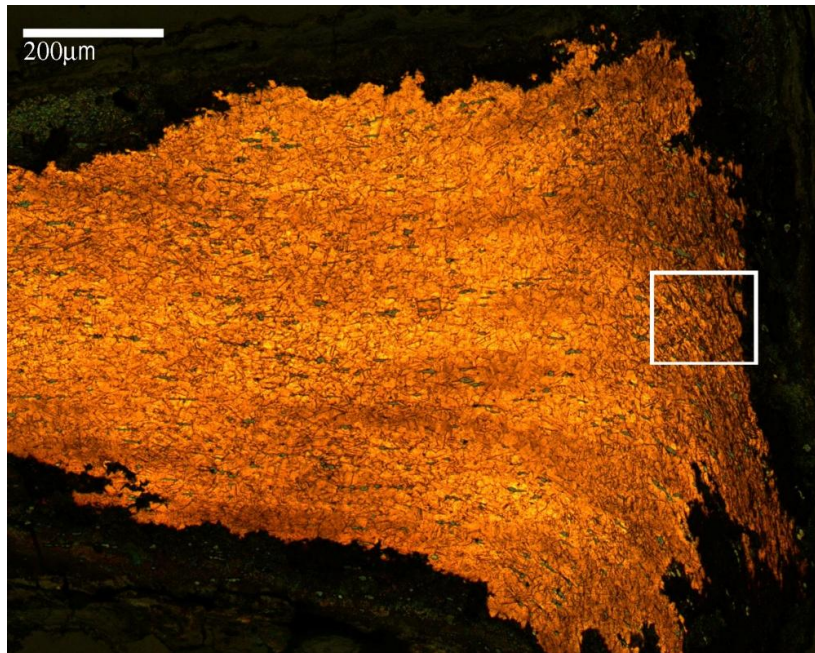


Figure 9 : coupe de languette présentant une structure recristallisée avec des inclusions de sulfure de cuivre allongées et horizontales. Le bord du trou de rivet (extrémité droite) présente une exception où la structure devient écrouie et les inclusions de sulfure de cuivre virent vers une direction verticale (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

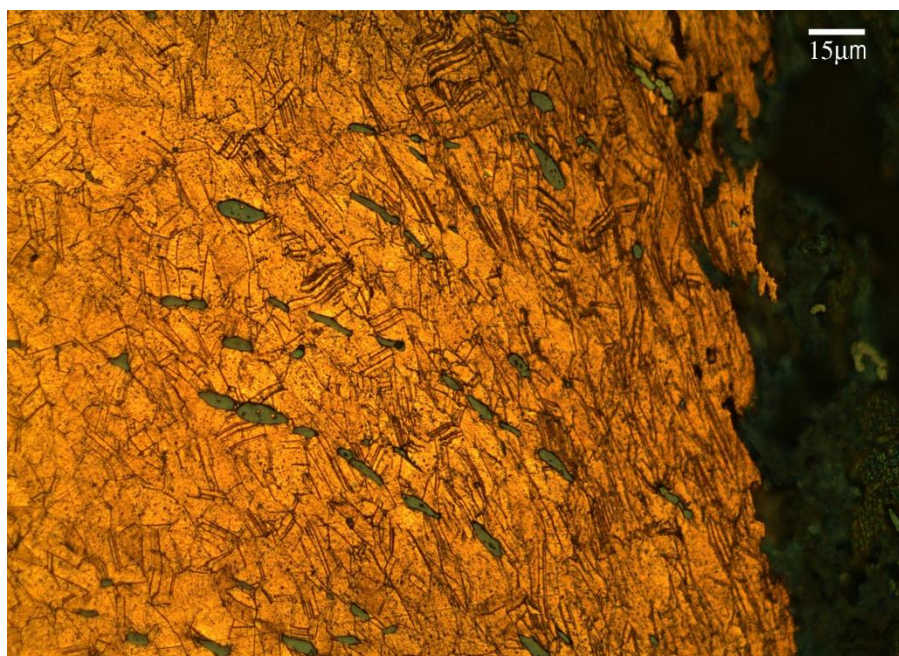


Figure 10 : détail du bord du trou de rivet (encadré en blanc dans la fig.9) présentant des grains polygonaux allongés associés à des macles mécaniques. Notons aussi le changement de direction des inclusions de sulfure de cuivre d'une direction horizontales à une direction verticale (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Poignard à lame simple 27857



Longueur totale : 101 mm	Diamètre du trou de rivet :
Longueur de la lame : 85 mm	Longueur du rivet : 17 et 12 mm
Largeur maximale de la lame : 32 mm	Diamètre du fût de rivet : 3.5 et 2.5 mm
Epaisseur maximale de la lame: 2.5 mm	Diamètre de la tête du rivet :
Epaisseur minimale de la languette: 1 mm	Poids : 32 g

Ce poignard a été retrouvé dans le dépôt γ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954). Il possède trois rivets. L'arme est recouverte d'une corrosion de couleur gris sombre et vert clair. Elle présente des croûtes terreuses volumineuses. Ce dernier type de corrosion couvre entièrement une des deux faces de l'objet. La pointe de la lame et une petite partie de sa languette manquent. Trois échantillons ont été prélevés pour examiner les coupes de la lame, la languette et le rivet. Celle du rivet nous permet d'observer la section longitudinale qui comprend aussi la tête de ce dernier. La corrosion a empêché l'exploitation des informations de l'échantillon de la lame.

La languette présente une structure recristallisée avec des grains équiaxes (Fig. 11) et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. Cependant, il existe sur sa surface une faible concentration de macles mécaniques, probablement provoquées par la cassure d'une partie de la languette, un polissage ou le perçage d'un trou de fixation. La coupe du rivet a permis l'observation du fût et de la tête. Le fût présente une structure recristallisée avec des grains de petites dimensions (Fig.12 et 13 a). La tête est dans un état écroui, elle présente des petits grains polygonaux allongés dans un sens perpendiculaire à l'axe du rivet et associés à des macles mécaniques (Fig.12 et 13 b). Les sulfures de cuivres sont allongées, elles suivent le sens de l'axe au niveau du fût puis divergent au fur et à mesure qu'elles s'approchent de la tête. A la surface de la tête elles sont perpendiculaires à l'axe de l'objet (Fig.13 b).

L'alliage utilisé dans la fabrication du poignard est un bronze à 10 Wt.% d'étain. Le métal utilisé pour la fabrication du rivet est un cuivre à l'arsenic (3 Wt.%).

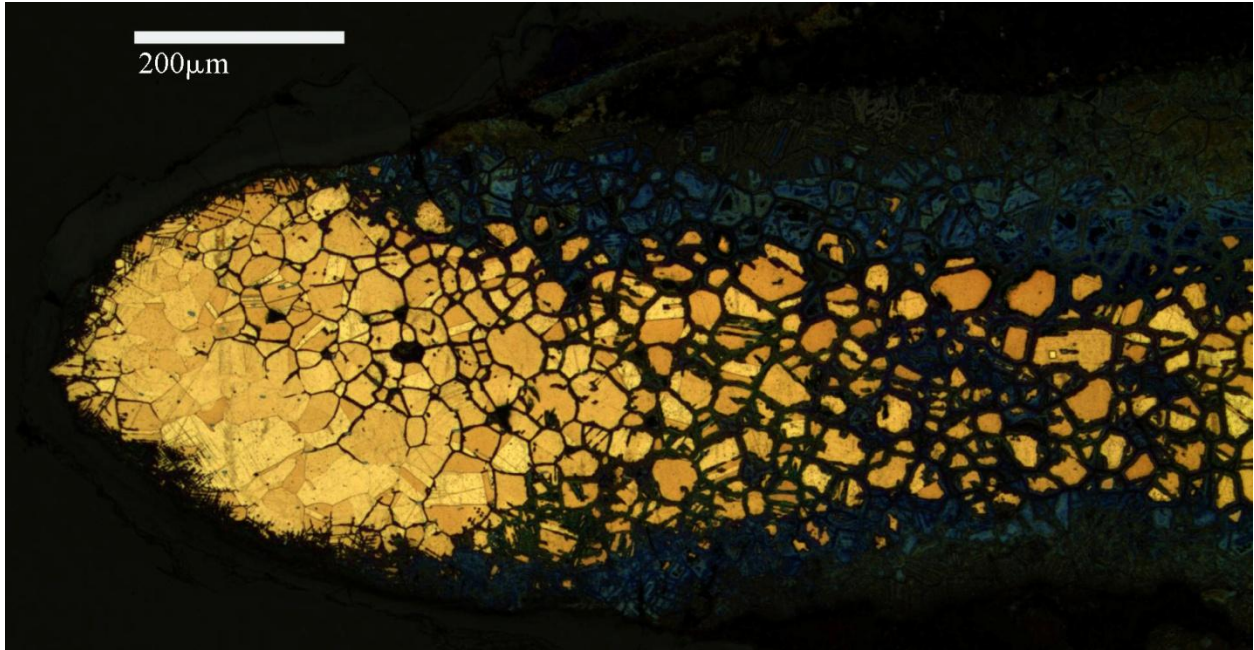


Figure 11 : coupe de la languette présentant une structure recristallisée. Les grains équiaxes sont associés à des macles thermiques sous forme de bandes de couleurs différentes que le grain qui les contient. Sur la surface de la languette, là où le métal est préservé, nous distinguons une faible concentration de macles mécaniques. (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3)

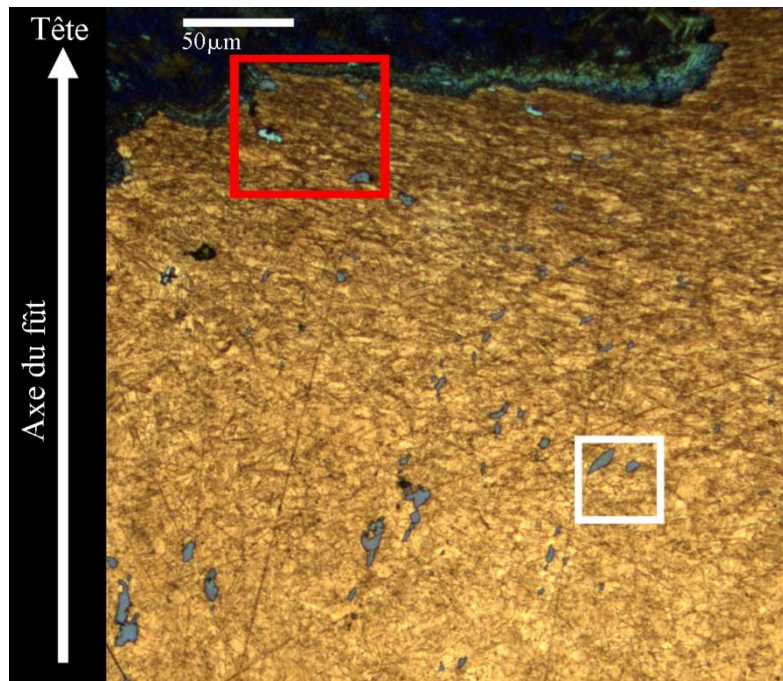


Figure 12 : coupe longitudinale du rivet révélant la structure écrouie de la tête (en haut, couleur foncée) et celle du fût qui est dans un état recristallisé. Nous remarquons aussi le changement de direction des sulfures de cuivre entre le fût et la tête (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

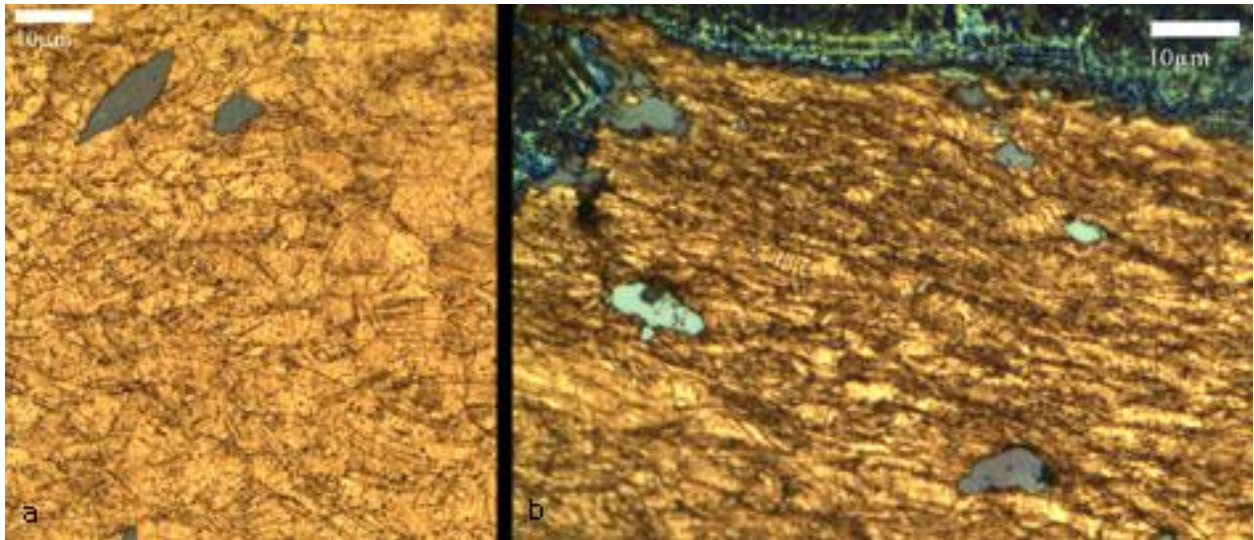


Figure 13: a- détail de la partie encadrée en blanc de la coupe du rivet. Structure cristalline du fût dans une zone proche de la tête : nous remarquons la direction oblique de l'allongement des inclusions de sulfure de cuivre par rapport à l'axe long du rivet; b- détail de la partie encadrée en rouge de la coupe du rivet. Tête du rivet dans état écroui avec une concentration importante de macles mécaniques ainsi que des sulfures de cuivre inclinées et perpendiculaires à l'axe long du fût (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Poignard à lame simple 56062



Longueur totale : 141 mm	Diamètre du trou de rivet :
Longueur de la lame : 131 mm	Longueur du rivet : 13 mm
Largeur maximale de la lame : 35 mm	Diamètre du fût de rivet : 4 mm
Épaisseur maximale de la lame : 4 mm	Diamètre de la tête du rivet :
Épaisseur minimale de la languette : non disponible	Poids : 42 g

Ce poignard provient de la chambre 2 du site de Khariji (Saidah, 1994). Il lui manque sa languette et sa pointe. Sa lame est cassée en son centre. La lame est recouverte d'une corrosion présentant des bubons et des croûtes de couleur vert et marron sombre. L'échantillon prélevé de ce poignard est complètement corrodé. Il n'a livré aucune donnée pertinente mise à part la présence de cuivre dans le métal utilisé dans la fabrication de cette arme.

Poignards à lame décorée

Poignard à lame décorée 9021



Longueur totale : 225 mm	Diamètre du trou de rivet : non disponible
Longueur de la lame : 193 mm	Longueur du rivet : 13 mm
Largeur maximale de la lame : 52 mm	Diamètre du fût de rivet : 3 mm
Épaisseur maximale de la lame : 5 mm	Diamètre de la tête du rivet : non disponible
Épaisseur minimale de la languette : 1 mm	Poids : 126 g

Ce poignard a été trouvé dans le dépôt λ *du champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 302). Il possède seulement 2 rivets; la partie de la languette qui devait comprendre le troisième rivet manque. Une des deux faces de l'arme est recouverte par une couche de corrosion peu rugueuse de couleur gris clair. Nous observons sur cette face des bubons et des croûtes. La deuxième face est recouverte de plusieurs plages de corrosion peu rugueuse de couleur vert sombre et vert clair. La fragilisation de la lame par la corrosion a entraîné plusieurs cassures au niveau du tranchant. Ces cassures ont révélé une corrosion de type lamellaire. Un échantillon a été prélevé au niveau du tranchant et un autre de la tête du rivet (Fig. 2) pour observer leurs coupes.

Le tranchant (Fig. 1) est dans un état écroui. Elle présente une structure de grains polygonaux allongés associés à des macles mécaniques. Les inclusions de sulfure de cuivre sont également allongées. Des fissurations ont été observées dans une zone légèrement corrodée. Une grande partie de l'échantillon prélevé du rivet est corrodée. Les quelques grains subsistants sont polygonaux et allongés, ils contiennent également des macles mécaniques (Fig. 3).

L'alliage utilisé pour la fabrication de ce poignard est un bronze à 14 Wt.% d'étain. Il est relativement « propre » par rapport à celui utilisé pour les autres poignards. Cet aspect a été déduit par la rareté des inclusions observées visuellement et confirmé par l'absence d'impuretés dans les résultats EDS. Le rivet est un bronze à 17 Wt.% d'étain. Cette teneur élevée en étain est due à des phénomènes d'enrichissement liés à la corrosion.

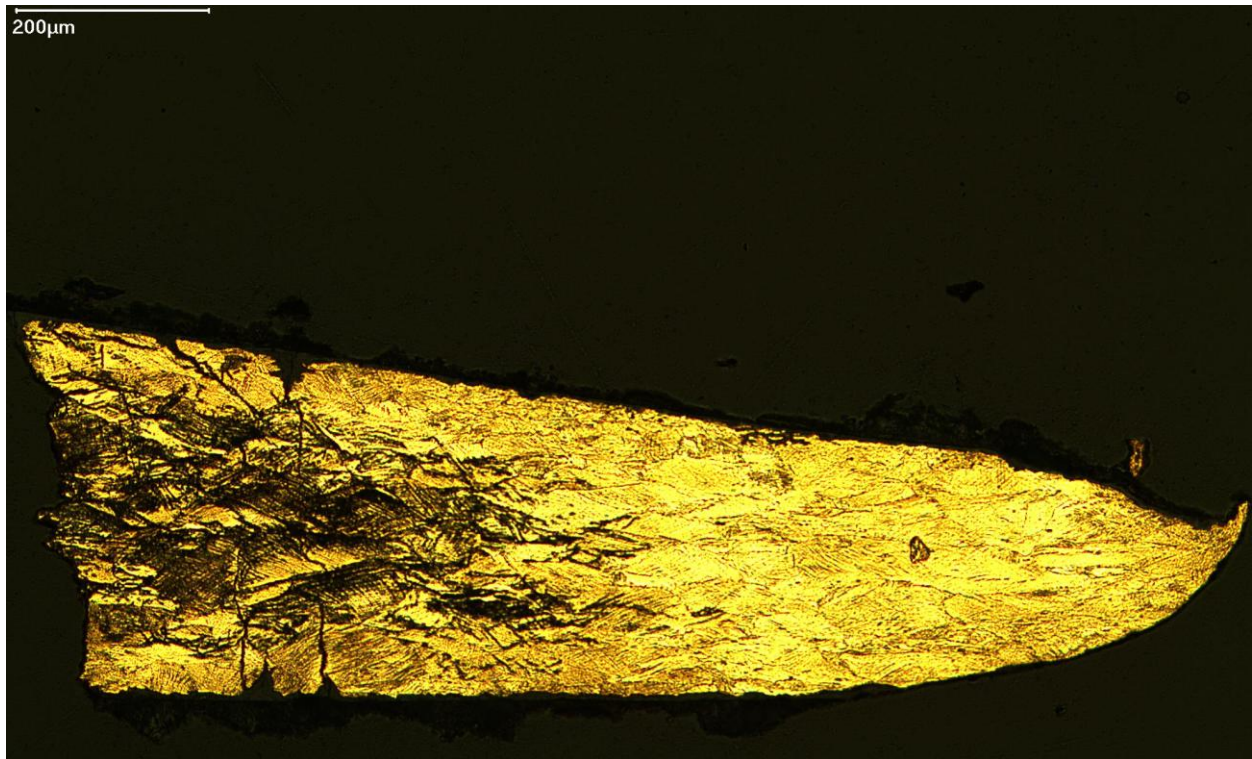


Figure 1: coupe transversale du tranchant révélant des macles mécaniques et des fissurations.

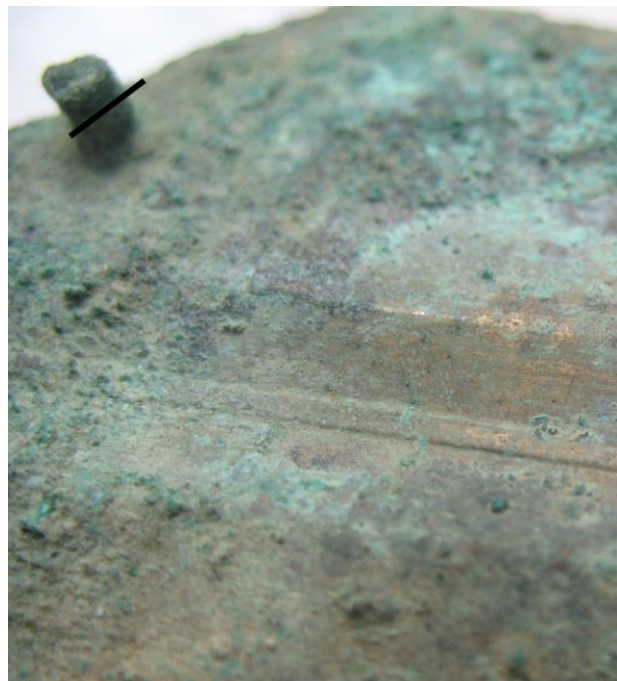


Figure 2: illustration indiquant de la zone prélevée du rivet. Ce prélèvement nous a permis d'observer la coupe transversale du rivet. Notons également les détails de la décoration de la lame constituée de deux nervures et d'un filet entre eux.

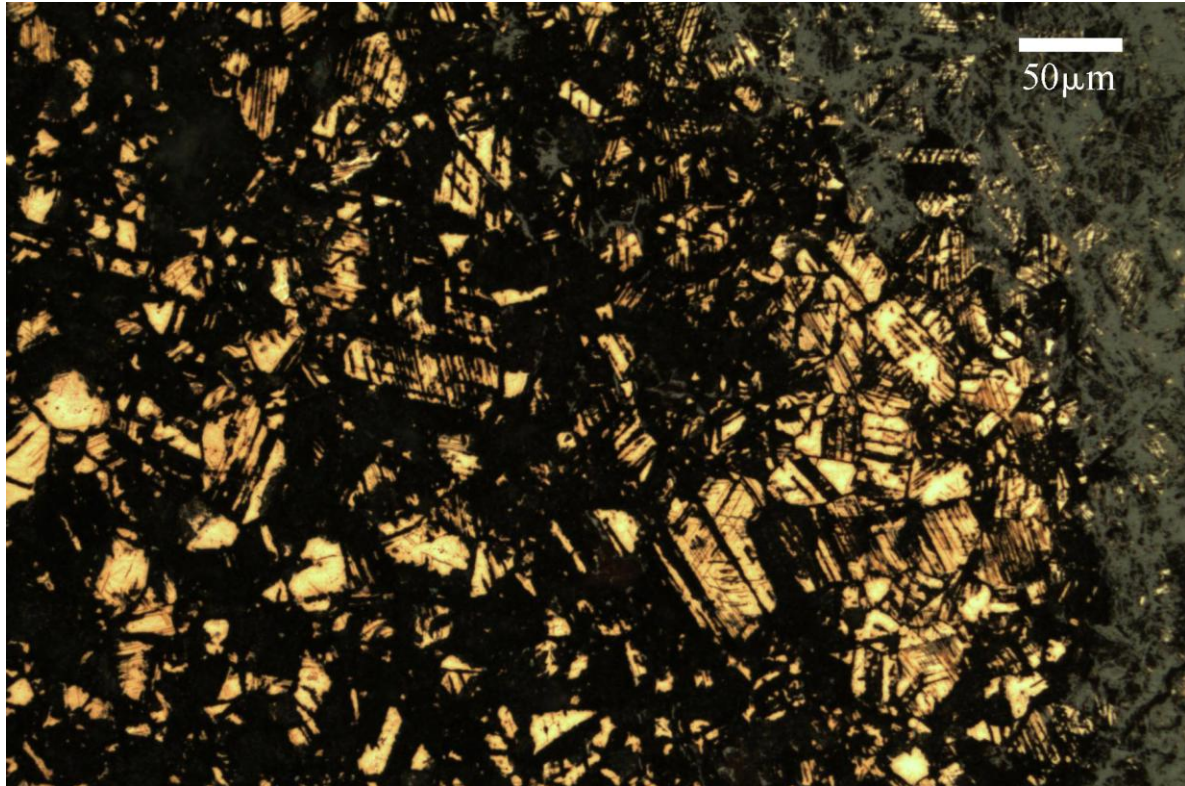


Figure 3 : quelques grains préservés observés sur la coupe transversale du rivet. Ils ont une forme polygonale allongée et présentent des macles mécaniques (Microscope optique en réflexion).

Poignard à lame décorée 10309



Longueur totale : 161 mm	Diamètre du trou de rivet : non disponible
Longueur de la lame : 161 mm	Longueur du rivet : non disponible
Largeur maximale de la lame : 24 mm	Diamètre du fût de rivet : non disponible
Epaisseur maximale de la lame: 3 mm	Diamètre de la tête du rivet : non disponible
Epaisseur minimale de la languette: non disponible	Poids : 32 g

Ce poignard a été trouvé dans le dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 189 ; pl. 108). L'arme est recouverte d'une couche homogène de corrosion de texture fine et de couleur gris sombre. Nous observons également de nombreuses piqûres et patelles. La languette, ainsi qu'une grande partie de lame manquent. Une restauration ancienne a probablement contribué à la perte d'une grande partie de l'arme. Deux échantillons ont été prélevés pour examiner la coupe transversale d'une des deux nervures et du tranchant.

Au niveau du tranchant, la structure cristalline est dans un état écroui ; elle présente des grains polygonaux, des macles mécaniques, des inclusions de sulfure de cuivre et des nodules de plomb allongés (Fig. 4). Cette partie a subi au moins une passe de martelage/recuit suivie par un martelage pour durcir le tranchant et probablement par un affûtage pour l'aiguiser.

La nervure est dans un état recristallisée. Les grains polygonaux sont équiaxes, les inclusions de sulfure de cuivre sont peu allongées, les nodules de plomb sont globulaires. Nous signalons la présence de quelques pores allongés (Fig. 5). Au vue de la position de ce prélèvement nous ne sommes pas en mesure de déterminer si cet état est le résultat d'un travail entrepris volontairement sur la partie centrale de la lame pour augmenter sa ténacité, ou si c'est un résultat indirect causé par le travail de déformation entrepris sur la languette et sur le tranchant. Une autre possibilité se présente : cet état peut être causé par un travail de déformation pour accentuer les décors (nervures, rainures et filets).

L'alliage utilisé est un bronze au Plomb avec 10 Wt.% d'étain et 4 Wt.% de Plomb. Nous avons détecté aussi de faibles teneurs en Arsenic et en Fer qui sont probablement des impuretés liées au cuivre.

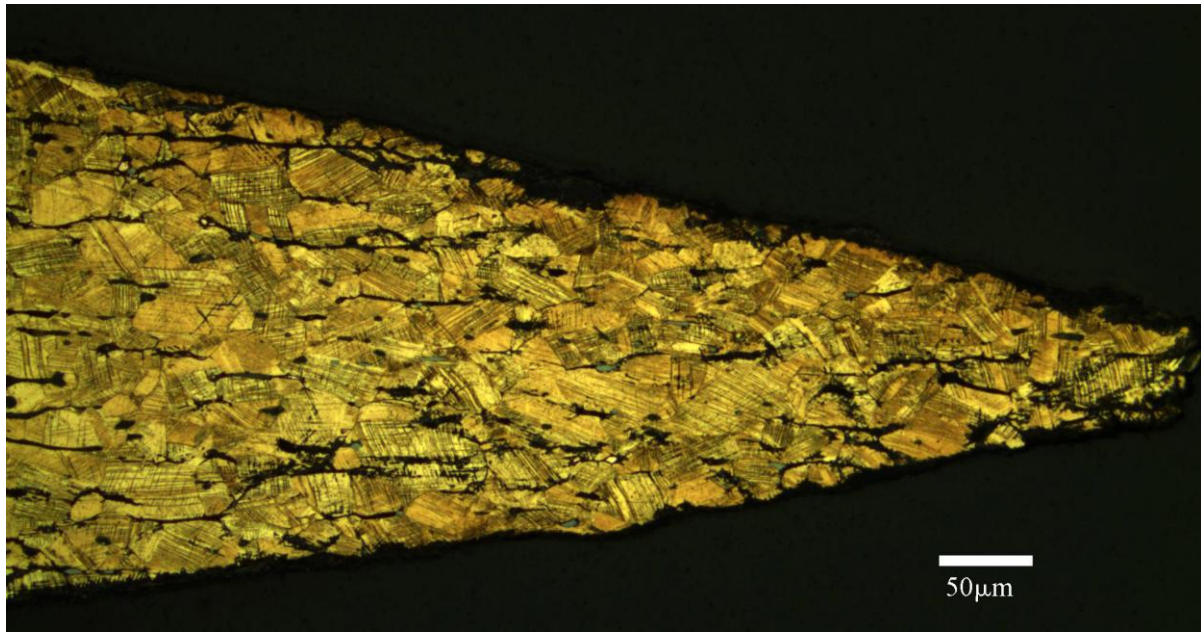


Figure 4 : coupe du tranchant en état écroui. Les nodules de plomb et les pores (en noire), les inclusions de sulfure de cuivre (en vert clair) et les grains sont allongés. Ces derniers sont couverts de macles mécaniques (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

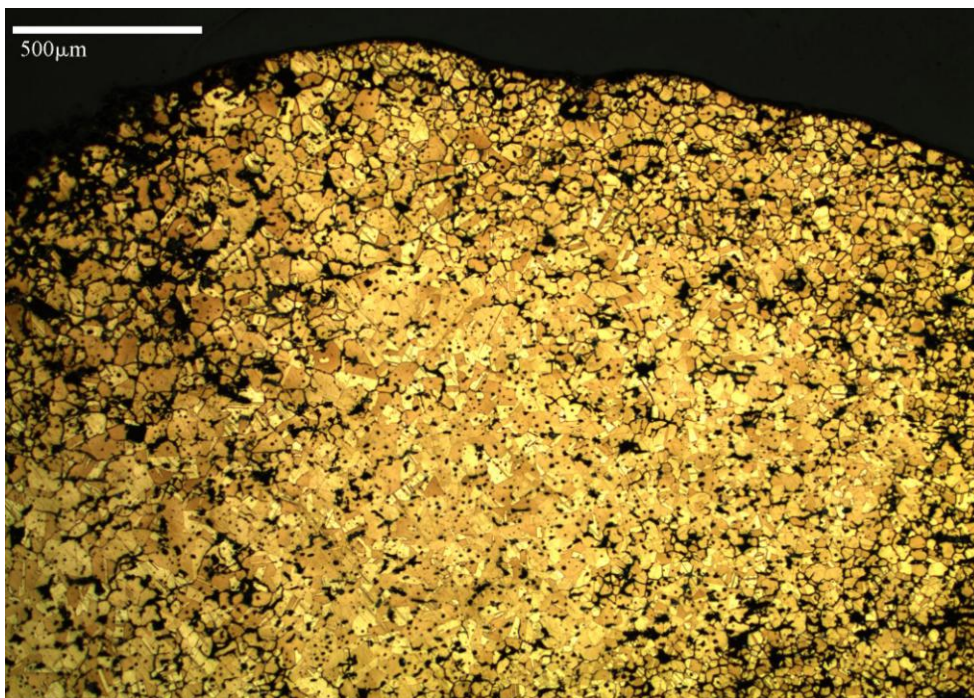


Figure 5 : coupe transversale d'une nervure. La structure est dans un état recristallisé (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Poignard à lame décorée 10811



Longueur totale : 172 mm	Diamètre du trou de rivet : 0.4 mm
Longueur de la lame : 145 mm	Longueur du rivet : non disponible
Largeur maximale de la lame : 42 mm	Diamètre du fût de rivet : non disponible
Epaisseur maximale de la lame: 3 mm	Diamètre de la tête du rivet : non disponible
Epaisseur minimale de la languette: 1 mm	Poids : 44 g

Le poignard 10811 a été retrouvé dans la salle C du *bâtiment II* au niveau de la levée XIX (Dunand, 1939 ; 261). La languette présente trois trous de rivet et la lame est décorée par cinq filets. L'arme est recouverte d'une couche homogène de corrosion fine de couleur brun sombre. Elle présente également quelques piqûres, des patelles et quelques crevasses. La corrosion et une ancienne restauration par un bain d'acide peuvent être à l'origine des trous situés dans la lame et de l'aspect dégradé de l'ensemble de son bord. Quatre prélèvements ont été réalisés pour étudier la lame et la languette. Deux échantillons ont été prélevés de la lame et deux autres de la languette. Ils présentent tous une structure recristallisée associée à des grains polygonaux équiaxes et des macles thermiques. Celles-ci augmentent en nombre dès qu'on s'approche des bords de la lame. Ainsi nous pouvons déduire que le travail de déformation était plus important sur les bords, comme le tranchant, que sur le cœur de la lame.

Le métal utilisé pour la fabrication de ce poignard est un cuivre à 2 Wt.% d'arsenic, il contient également 2 Wt.% de fer et environ 1 Wt.% de plomb. La matrice présente des sulfures de cuivre et des inclusions riches en fer (50 Wt.%).

Poignard à lame décorée 10831



Longueur totale : 164 mm	Diamètre du trou de rivet : non disponible
Longueur de la lame : 153 mm	Longueur du rivet : non disponible
Largeur maximale de la lame : 32 mm	Diamètre du fût de rivet : non disponible
Épaisseur maximale de la lame: 5 mm	Diamètre de la tête du rivet : non disponible
Épaisseur minimale de la languette: 1 mm	Poids : 33 g

D'après Dunand (1958 ; 978 ; fig. 1093) le poignard 10831 a été découvert dans la levée XXIII du carré 11/22. La lame est décorée au centre par cinq rainures profondes. L'arme est recouverte d'une couche homogène de corrosion fine de couleur brun sombre. Elle présente également quelques piqûres et quelques patelles. L'absence de plusieurs parties de la lame et de la languette est probablement due à l'action de la corrosion et à une ancienne restauration par un bain d'acide. Quatre prélèvements ont été pris pour observer les coupes des différentes parties de la lame ainsi que la surface de la languette.

La lame présente une structure de brut de fonderie (à part pour le tranchant). Ceci implique que les rainures ont été conçues durant le moulage et non pas incisées (Fig. 6). Le bout tranchant est dans un état écroui, il présente une forte concentration des macles mécaniques. L'absence de grains polygonaux indique qu'il n'y a pas eu de recuit dans cette partie. La languette est dans un état recuit. Les grains dans cette partie sont polygonaux et équiaxes et les inclusions de sulfure de cuivre sont allongées.

Le métal utilisé est un cuivre à 4 Wt.% d'arsenic. Il contient également 1 Wt.% d'étain, 1 Wt.% d'antimoine, 1 Wt.% de nickel et 0,2 Wt.% de soufre. La matrice présente des phases riches en nickel (9 Wt.%), en antimoine (15 Wt.%), en étain (4 Wt.%) et en arsenic (18 Wt.%) (Fig. 7).

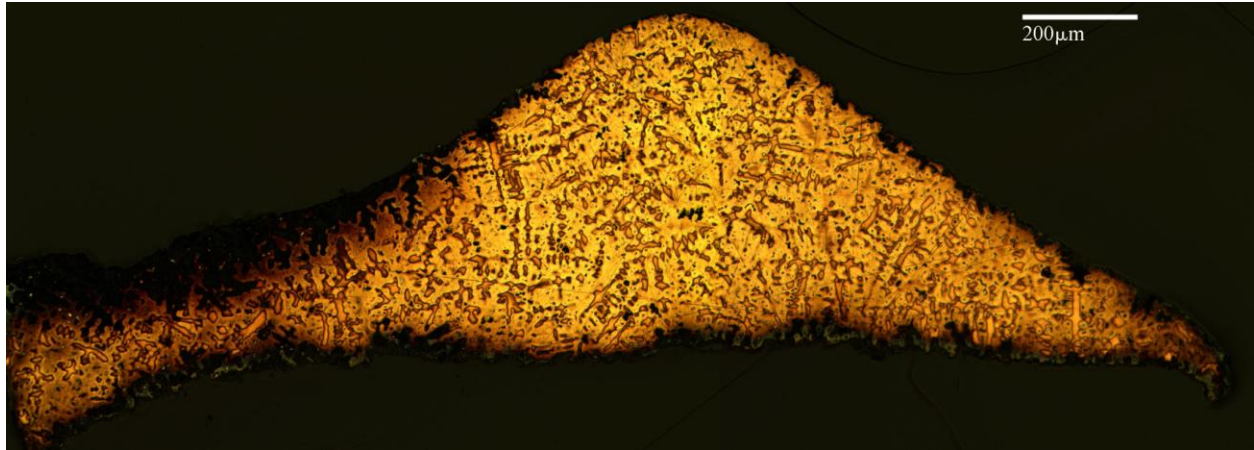


Figure 6 : coupe transversale d'une rainure présentant une structure dendritique (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

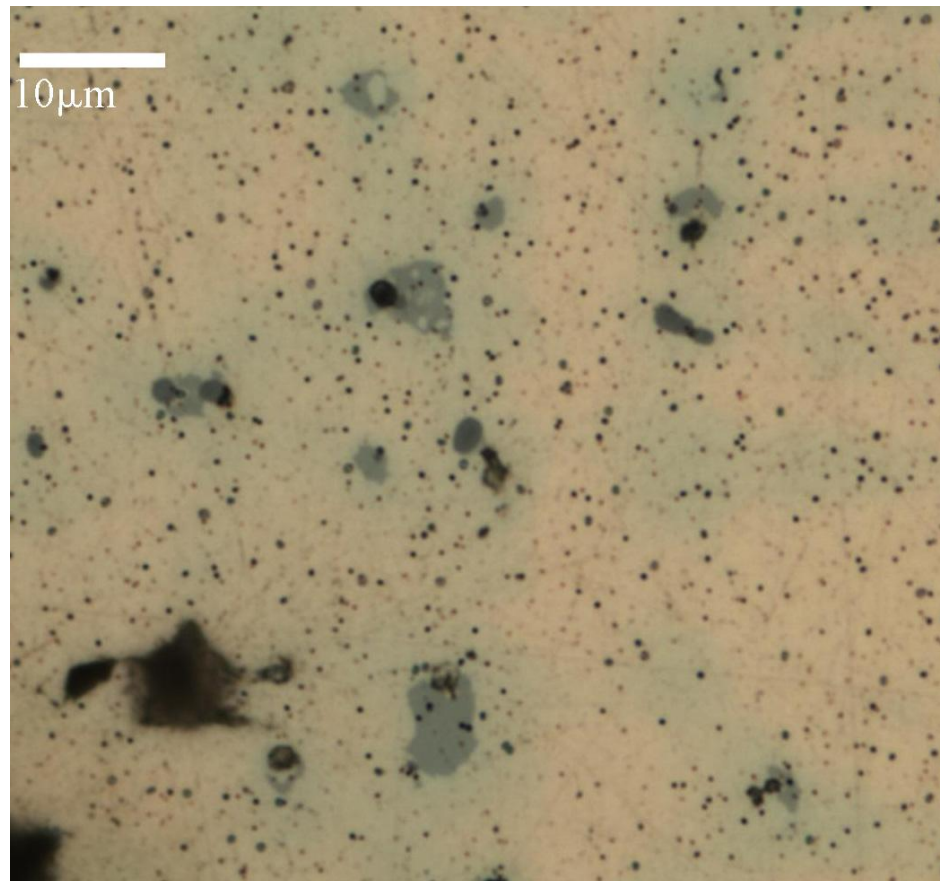


Figure 7 : coupe de la pointe de lame présentant des phases (bleu grisâtre claire) riches en As, Sb, Sn et Ni (Microscope optique en réflexion).

Poignard à lame décorée 11930



Longueur totale : 80 mm	Diamètre du trou de rivet : 3 mm
Longueur de la lame : 67 mm	Longueur du rivet : non disponible
Largeur maximale de la lame : 20 mm	Diamètre du fût de rivet : non disponible
Épaisseur maximale de la lame : 2 mm	Diamètre de la tête du rivet : non disponible
Épaisseur minimale de la languette : < 0.5 mm	Poids : 9 g

Cette arme provient du dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 189). Elle possède trois trous de rivet. La lame est décorée par au moins deux rainures. Ce poignard a perdu plusieurs parties de la lame et de la languette. L'arme est recouverte d'une couche homogène de corrosion de texture fine et de couleur brun sombre. Nous observons également plusieurs crevasses, patelles et piqûres ainsi que quelques croûtes. L'état actuel du poignard nous mène à penser que la perte d'une grande partie de l'objet est le résultat d'une ancienne restauration. Deux échantillons ont été prélevés pour étudier la coupe de la lame et la surface d'une partie de la languette comprenant le bord du trou de rivet.

La lame est dans un état écroui, elle présente des grains polygonaux et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. Sur les grains nous trouvons une forte concentration de macles mécaniques (Fig. 8). La languette (Fig. 9) présente, en générale, une structure recristallisée. Par contre, sur le bord du trou de rivet, les grains sont de taille plus réduites par rapport à ceux du reste de la languette. De plus, nous avons détecté dans cette partie une forte concentration de macles mécaniques (Fig. 10). La transition entre la zone présentant cet état et celle à état recristallisée est progressive ; la taille des grains augmente et les macles deviennent plus rares en s'éloignant du bord du trou de rivet. Cette transition est probablement due à la déformation causée par le perçage du trou de fixation suivie par un recuit et ensuite par l'enfoncement du rivet. Cette dernière déformation aurait provoqué la formation de macles mécaniques.

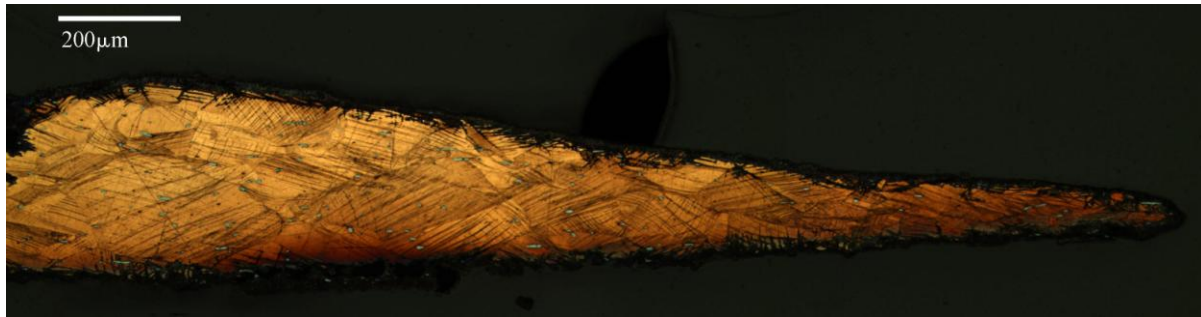


Figure 8 : coupe du tranchant révélant un état écroui avec des grains polygonaux allongés associés à des macles mécaniques (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

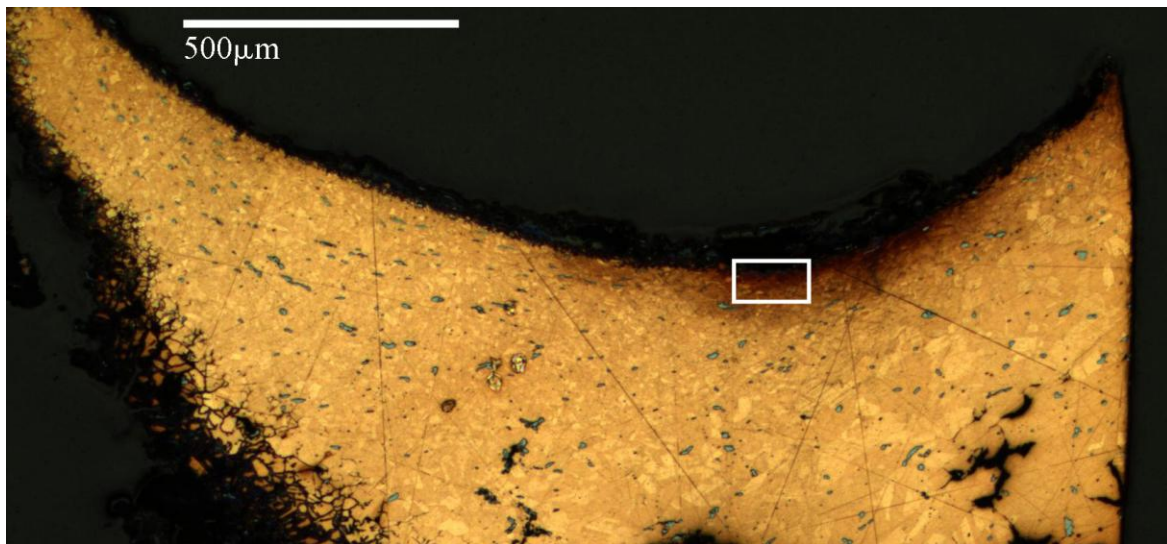


Figure 9 : structure de la languette, observée à partir de la surface polie de l'objet, présentant un état écroui sur le bord du trou du rivet et un état recristallisé sur le reste de l'échantillon. Notons le changement de la taille des grains entre le bord et le reste de la languette où ils sont nettement plus grands (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

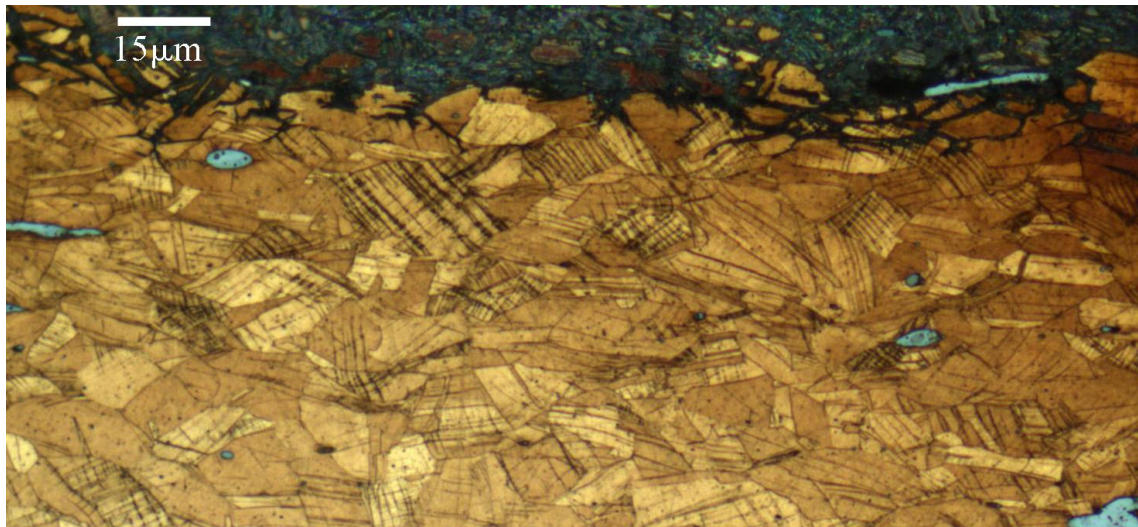


Figure 10 : détails de la partie encadrée en blanc du bord du trou de rivet (Fig. 9). Les grains allongés sont associés à des macles mécaniques (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Poignard à lame décorée 26757



Longueur totale : 266 mm	Diamètre du trou de rivet : non disponible
Longueur de la lame : 232 mm	Longueur du rivet : 16 mm
Largeur maximale de la lame : 55 mm	Diamètre du fût de rivet : 3 mm
Épaisseur maximale de la lame: 9 mm (T.C.)	Diamètre de la tête du rivet : non disponible
Épaisseur minimale de la languette: 4 mm (T.C.)	Poids : 294 g

Ce poignard provient de la tombe 14.14 du site de Tell Arqa dans la tombe 14.14. Il était accompagné de deux pointes de lance et d'une hache fenestrée (Thalmann, 2000 ; 53 ; fig. 43). Le manche était fixé par trois rivets qui sont toujours présents dans la languette. La lame est décorée par cinq filets, une partie de la languette et les rivets sont couverts par une plaque décorative en métal blanc non ferreux (Fig. 12). Sur une des faces il subsiste des restes d'ossements. L'utilisation d'une partie de la tombe comme four de potier à une époque postérieure a contribué à la dégradation de l'arme. Suite à une restauration l'arme est aujourd'hui recouverte d'une couche homogène de corrosion fine de couleur gris sombre. Sur la surface nous observons également des crevasses et des piqûres. La corrosion a entraîné une augmentation importante du volume de la lame. Les contraintes produites lors de ce changement morphologique ont créé des fissurations de grandes tailles entre les deux faces de la lame et des cassures sur le tranchant. La plaque décorative est couverte d'une corrosion homogène fine de couleur gris clair. Trois échantillons ont été prélevés pour observer la coupe de la lame, la coupe transversale d'un rivet et la coupe d'une partie de la plaque d'argent présentant un relief.

L'échantillon prélevé de la lame est inexploitable à cause de la corrosion. L'épaisseur de la plaque décorative est d'environ 140 μm , elle présente un relief angulaire qui doit reproduire un filet séparant la lame de la languette (Fig. 13). La corrosion a empêché l'étude de la structure de la plaque mais nous avons réussi, par EDXS, à déterminer la présence de forte teneur d'argent ainsi que de l'or et du cuivre en des teneurs beaucoup moins importantes. L'examen de la coupe transversale du rivet a révélé que ce dernier est fait à partir d'une plaque roulée (Fig. 11). L'épaisseur de cette dernière diminue en allant de l'intérieur vers l'extérieur. Le rivet présente une structure recristallisée.

Le rivet est fait à partir d'un cuivre à l'arsenic (2 Wt.%). Il contient également 1 Wt.% de fer.

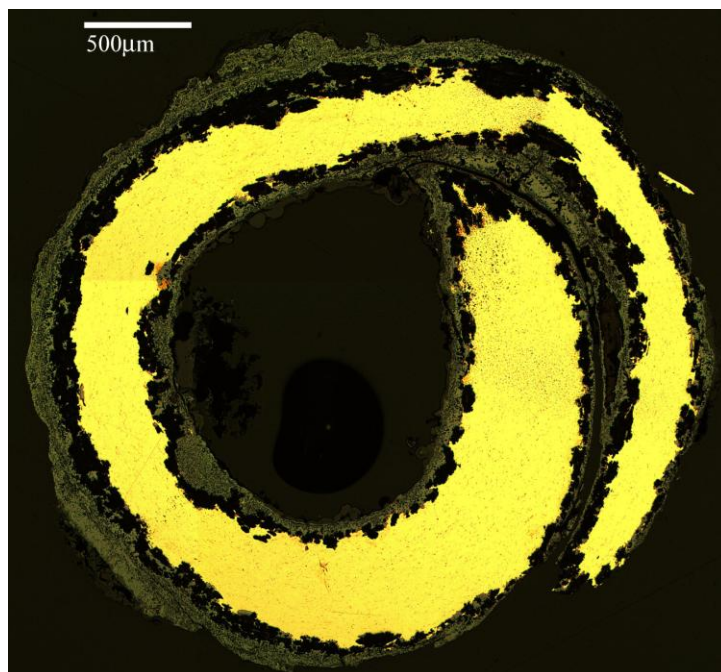


Figure 11 : coupe transversale du rivet montrant la plaque roulée et la variation de l'épaisseur de l'intérieur de la spirale vers l'extérieur (Microscope optique en réflexion).



Figure 12 : plaque décorative en argent (couleur gris), avec la zone prélevée marquée en noir

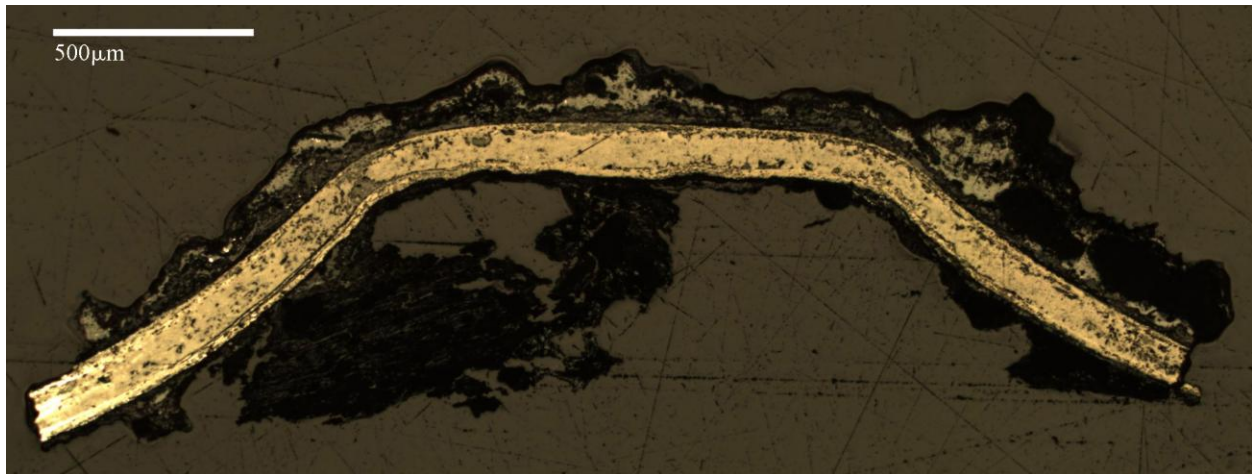


Figure 13 : coupe révélant la forme de la plaque en argent. Cette forme reproduisait le filet, perpendiculaire à l'axe du poignard, séparant la languette de la lame (Microscope optique en réflexion).

Poignard à lame décorée 27871



Longueur totale : 172 mm	Diamètre du trou de rivet : non disponible
Longueur de la lame : 172 mm	Longueur du rivet : non disponible
Largeur maximale de la lame : 32 mm	Diamètre du fût de rivet : non disponible
Épaisseur maximale de la lame : 3.5 mm	Diamètre de la tête du rivet : non disponible
Épaisseur minimale de la languette : non disponible	Poids : 61 g

Ce poignard a été trouvé dans le dépôt λ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 302). L'arme a perdu sa languette, sa pointe de lame et une partie du tranchant. Il semble qu'elle ait subi une restauration par bain d'acide. Elle est recouverte par une couche de couleur brun sombre de corrosion. Cette couche fine et homogène est associée à des crêtes et des piqûres. Le centre de l'arme présente une fine couche de corrosion de couleur vert clair. Un échantillon a été prélevé de l'extrémité inférieure de la lame qui devait correspondre à de la languette.

L'échantillon (Fig. 14) présente des grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques. Les fissurations, généralement de direction oblique par rapport à l'axe transversale, sont abondantes. Une concentration importante de macles mécaniques a été observée sur les zones proches de la surface de l'objet. L'alliage utilisé pour la fabrication de ce poignard est un bronze à 15 Wt.%.

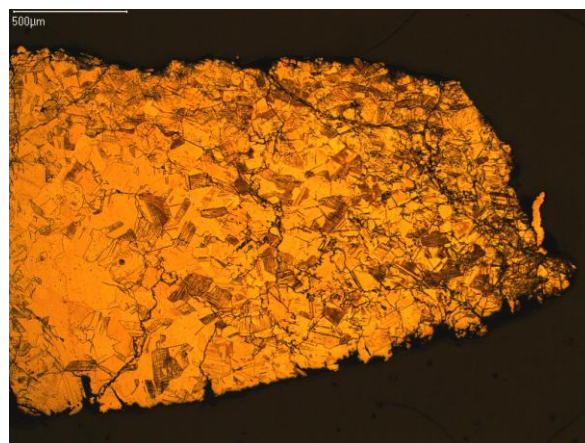


Figure 14 : coupe de l'extrémité inférieure de la lame présentant des grains polygonaux équiaxes, des microfissures, des macles thermiques et des macles mécaniques (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Poignard à lame décorée 27883



Longueur totale : 197 mm	Diamètre du trou de rivet : non disponible
Longueur de la lame : 197 mm	Longueur du rivet : non disponible
Largeur maximale de la lame : 50 mm	Diamètre du fût de rivet : non disponible
Épaisseur maximale de la lame : 5 mm	Diamètre de la tête du rivet : non disponible
Épaisseur minimale de la languette : non disponible	Poids : 127 g

Ce poignard provient du dépôt λ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 302). L'arme a perdu sa languette et sa pointe de lame. Elle est recouverte d'une corrosion peu rugueuse dont les dépôts sont de couleur gris sombre et vert claire. Un échantillon a été prélevé de la lame pour étudier la coupe du tranchant.

La corrosion, ayant affecté partiellement l'échantillon, a permis de mettre en évidence des grains polygonaux allongés et des macles mécaniques. L'analyse des grains de métal sain montre que l'alliage utilisé pour la fabrication de ce poignard est un bronze à 15 Wt.% d'étain.

Poignard à lame décorée 27902



Longueur totale : 138 mm	Diamètre du trou de rivet : non disponible
Longueur de la lame : 138 mm	Longueur du rivet : non disponible
Largeur maximale de la lame : 34 mm	Diamètre du fût de rivet : non disponible
Épaisseur maximale de la lame : 3 mm	Diamètre de la tête du rivet : non disponible
Épaisseur minimale de la languette : non disponible	Poids : non disponible

Ce poignard appartient au dépôt ζ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 254). Il ne reste de cette arme qu'une partie de la lame. Elle présente une nervure centrale décorée par une double rainure. Une couche de corrosion à texture fine de couleur gris sombre recouvre l'ensemble de ce poignard. L'étude de cet objet se limite aux analyses des isotopes du plomb.

Pointes de lance à languette rivetée

Pointe de lance à languette rivetée 9031



Longueur totale : 123 mm	Epaisseur minimale de la languette: 3 mm
Longueur de la lame : 104 mm	Diamètre du trou de rivet : 4 mm
Largeur maximale de la lame : 30 mm	Poids : 40 g
Epaisseur maximale de la lame: 5 mm	

Cette pointe de lance provient du dépôt γ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 190). La languette présente deux trous de rivet. L'arme a perdu de la matière au niveau de la partie inférieure de la lame. Elle est recouverte d'une corrosion à dépôts foisonnants de couleur gris sombre et vert sombre. Celle-ci est associée à des crêtes et des bubons. Un échantillon a été prélevé pour observer et étudier une coupe de la languette.

L'échantillon présente des grains polygonaux equiaxes associés à des macles thermiques et mécaniques ainsi que des inclusions de sulfure de cuivre allongées. Sur une partie proche de la surface constituant un coin de la languette, les grains deviennent allongés et la quantité des macles mécaniques augmente considérablement.

L'alliage constituant cette arme est un cuivre à 4 Wt.% d'arsenic. Il contient également de faible quantité (0.5 Wt.%) de Fer et de soufre.

Pointe de lance à languette rivetée 9046



Longueur totale : 271 mm	Epaisseur minimale de la languette: 4 mm
Longueur de la lame : 223 mm	Diamètre du trou de rivet : 4.5 mm
Largeur maximale de la lame : 41 mm	Poids : 217 g
Epaisseur maximale de la lame: 8 mm	

Cette pointe de lance a été trouvée dans le dépôt κ du *champ aux offrandes*. La section de la languette de cette arme est de forme hexagonale. La lame, à forte nervure centrale, a perdu des parties de son tranchant et de sa pointe. L'arme est recouverte d'une fine couche homogène de corrosion de couleur gris sombre et de parcelles de corrosion locale de couleur gris et vert sombre. Un échantillon a été prélevé pour étudier la coupe du tranchant.

L'échantillon (Fig. 1) présente des grains polygonaux allongés, des macles mécaniques, des nodules de plomb et des microfissures. L'alliage utilisé pour la fabrication de cette arme est un bronze à 15 Wt.% d'étain. Il contient également environ 1 Wt.% de plomb.

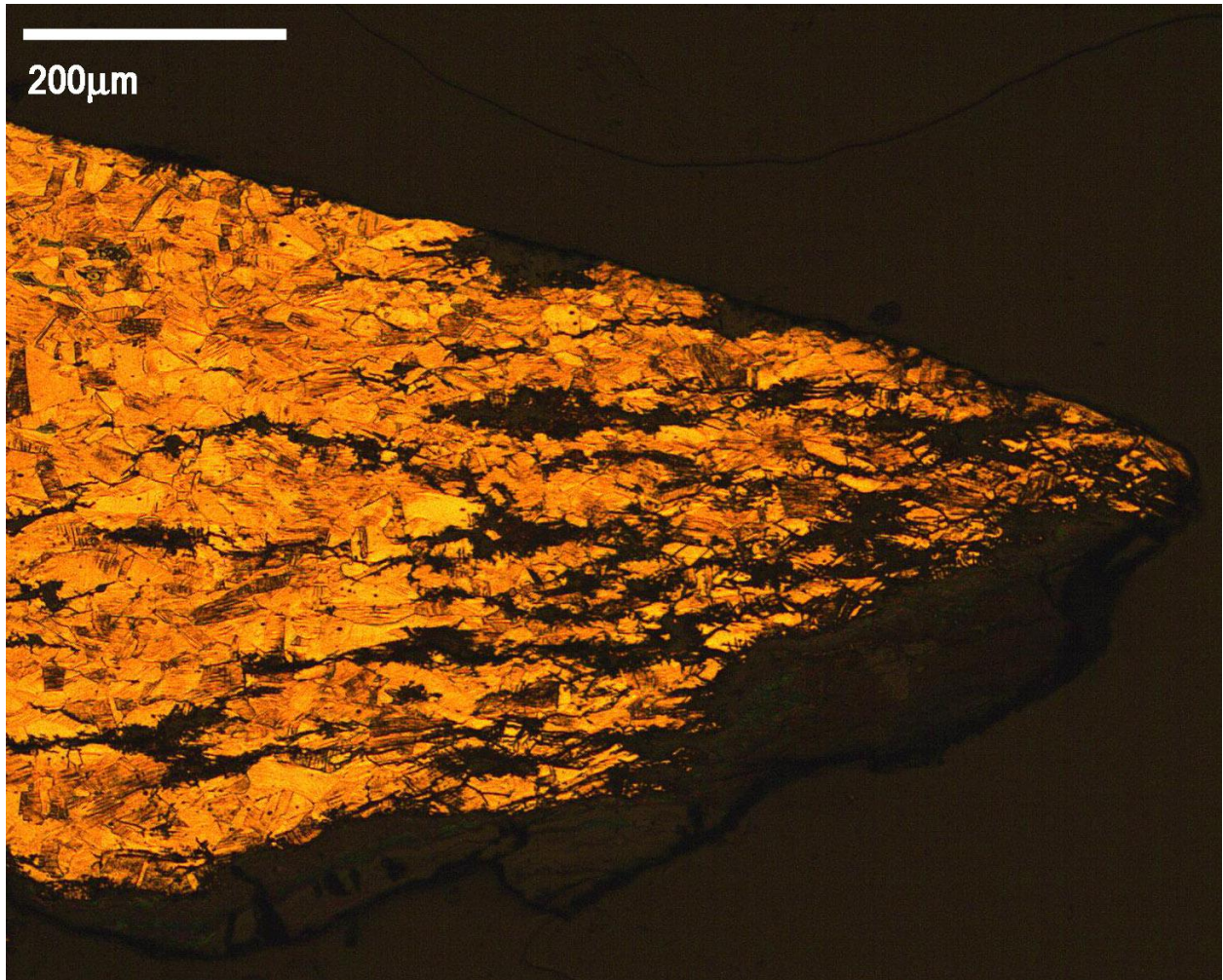


Figure 1 : coupe du tranchant présentant des grains polygonaux allongés, des macles mécaniques et des microfissures remplies de produit de corrosion (Microscope optique en réflexion, Attaque FeCl_3).

Pointe de lance à languette rivetée 9050



Longueur totale : 103 mm	Epaisseur minimale de la languette: 2 mm
Longueur de la lame : 79 mm	Diamètre du trou de rivet : 3 mm
Largeur maximale de la lame : 26 mm	Poids : 34 g
Epaisseur maximale de la lame: 5 mm	

Cette pointe de lance appartient au dépôt γ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 190, 1950 ; pl. 104). Les deux trous de fixation présentent des contours irréguliers. Suite à une fragilisation causée par la corrosion, l'arme a perdu une partie de sa lame. Elle est recouverte d'un côté par une corrosion à aspect hétérogène de couleur gris sombre, gris clair et vert sombre. Elle comporte des croûtes terreuses et des bubons. Un échantillon a été prélevé pour étudier la coupe de la nervure de la lame.

L'échantillon (Fig. 2 et 3) présente des grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. L'alliage constituant cette arme est un cuivre à 3 Wt.% d'arsenic.

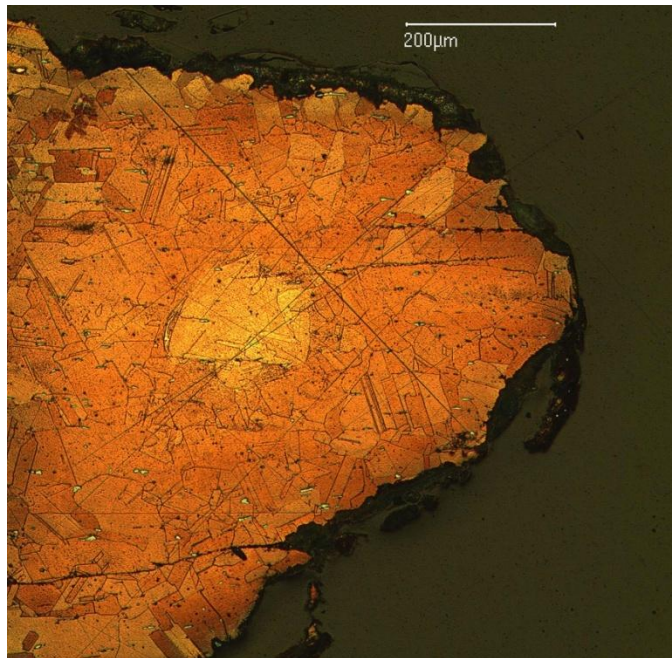


Figure 2 : coupe transversale de la lame révélant une structure recristallisée (Microscope optique en réflexion, Attaque FeCl_3).

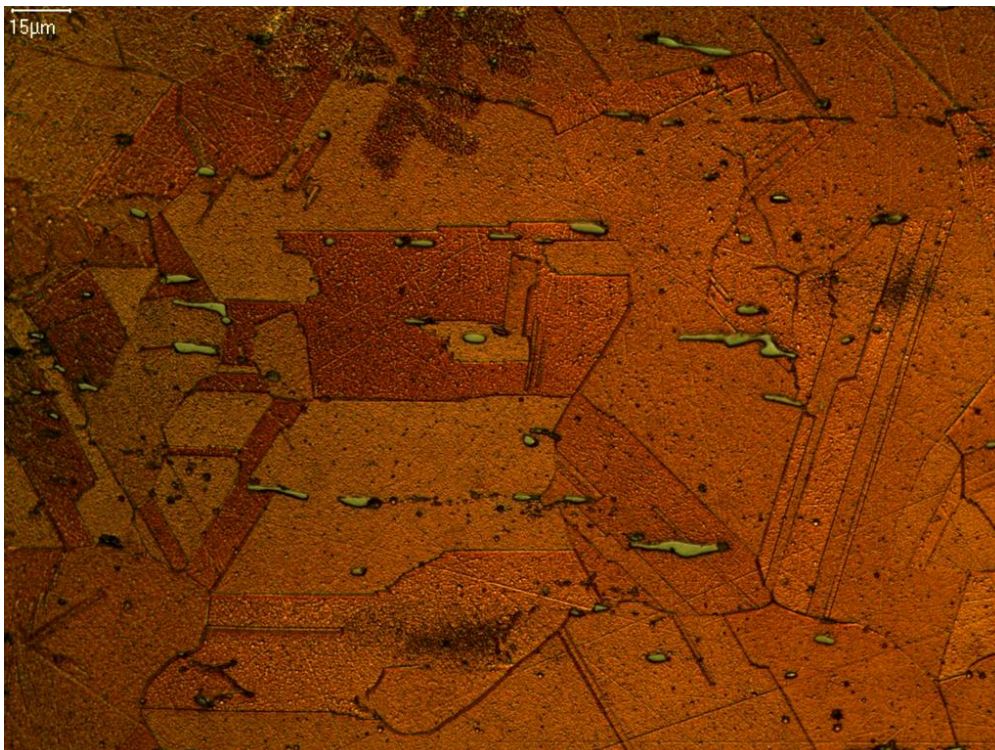


Figure 3 : détail de la coupe de la lame de 9050. La structure cristalline présente des grains polygonaux équiaxes, des macles thermiques et des inclusions de sulfure de cuivre (gris bleuté) allongées (Microscope optique en réflexion, Attaque FeCl_3).

Pointe de lance à languette rivetée 9051



Longueur totale : 129 mm	Epaisseur minimale de la languette: 2 mm
Longueur de la lame : 106 mm	Diamètre du trou de rivet : 4.5 et 6 mm
Largeur maximale de la lame : 32 mm	Poids : 56 g
Epaisseur maximale de la lame: 6 mm	

Cette pointe de lance a été trouvée dans le dépôt γ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 190, 1950 ; pl. 104). Elle possède quatre trous de rivet de diamètres variables. Le contour des bords des trous est irrégulier. L'arme a perdu l'extrémité inférieure de la languette. Celle-ci contenait une partie du bord d'un quatrième trou de rivet. La pointe de lance est recouverte d'une corrosion à aspect hétérogène constituée de couches de couleurs gris sombre, vert clair, vert sombre et gris clair. Celles-ci sont associées à des bubons, des croûtes terreuses, des crevasses et des piqûres. Un échantillon a été prélevé pour étudier l'extrémité cassée de la languette contenant le bord du quatrième trou de rivet.

L'échantillon présente une structure de grains polygonaux et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. Les grains sont équiaxes dans le centre de l'échantillon et au niveau du bord du trou de rivet (Fig. 5). Par contre, ils sont allongés et sont associés à des macles mécaniques au niveau des surfaces extérieures (Fig. 4). Le bord du trou de rivet (Fig. 5) présente un profil en double biseau contenant quelques microfissures. L'orientation de l'allongement des inclusions de sulfure de cuivre reproduit l'évolution de ce profil. L'alliage constituant cette arme est un cuivre à 3 Wt.% d'arsenic.

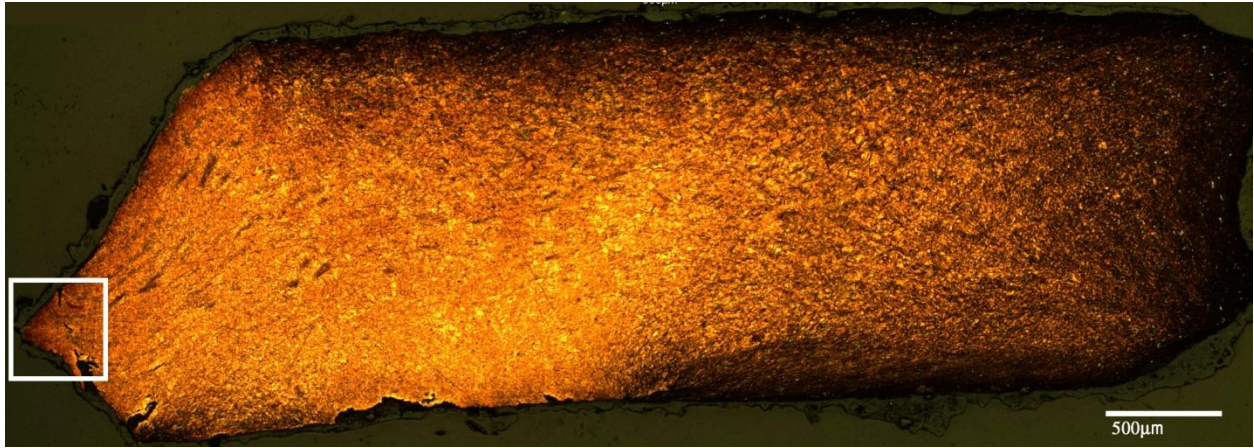


Figure 4 : coupe transversale de la languette présentant un état recristallisé dans le centre et sur le bord du trou de rivet (à gauche) ainsi que un état écroui sur les autres bords. (Microscope optique en réflexion, attaque au FeCl_3).

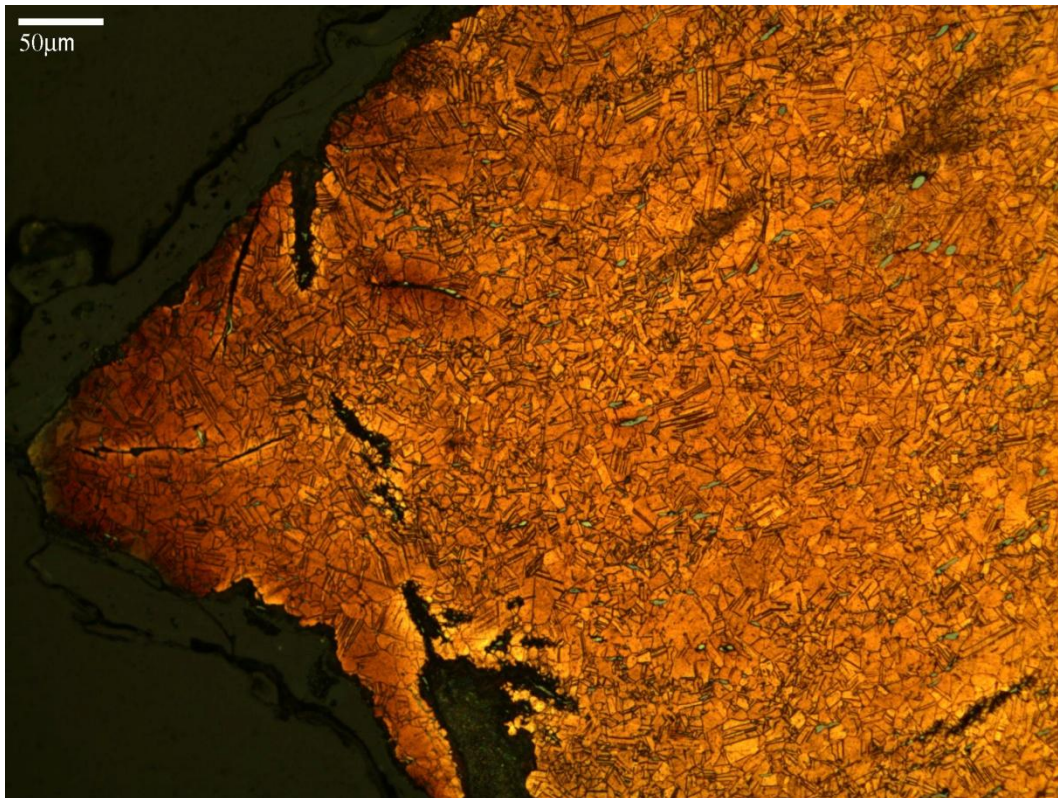


Figure 5 : détails du bord du trou en double biseau montrant la structure recristallisée dans la zone encadrée en blanc de la figure 4 (Microscope optique en réflexion, attaque au FeCl_3).

Pointe de lance à languette rivetée 10334



Longueur totale : 225 mm	Épaisseur minimale de la languette: 2 mm
Longueur de la lame : 167 mm	Diamètre du trou de rivet : 5 et 7 mm
Largeur maximale de la lame : 38 mm	Poids : 119 g
Épaisseur maximale de la lame: 6 mm	

Cette pointe de lance a été découverte dans le dépôt γ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 191, 1950 ; pl. 104). Elle possède deux trous de rivet de diamètres variables et de contours irréguliers. Fragilisé par l'action de la corrosion, la lame a perdu une partie de son tranchant. La pointe de lance est recouverte d'une corrosion similaire à celles des trois autres pointes de lance provenant du même dépôt d'offrande. Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe du tranchant.

L'échantillon (Fig. 6) présente des grains polygonaux allongés et des macles mécaniques. Les inclusions de sulfure de cuivre observées sont allongées et fracturées. Cette arme a été fabriquée à partir d'un cuivre à 1.5 Wt.% d'arsenic.

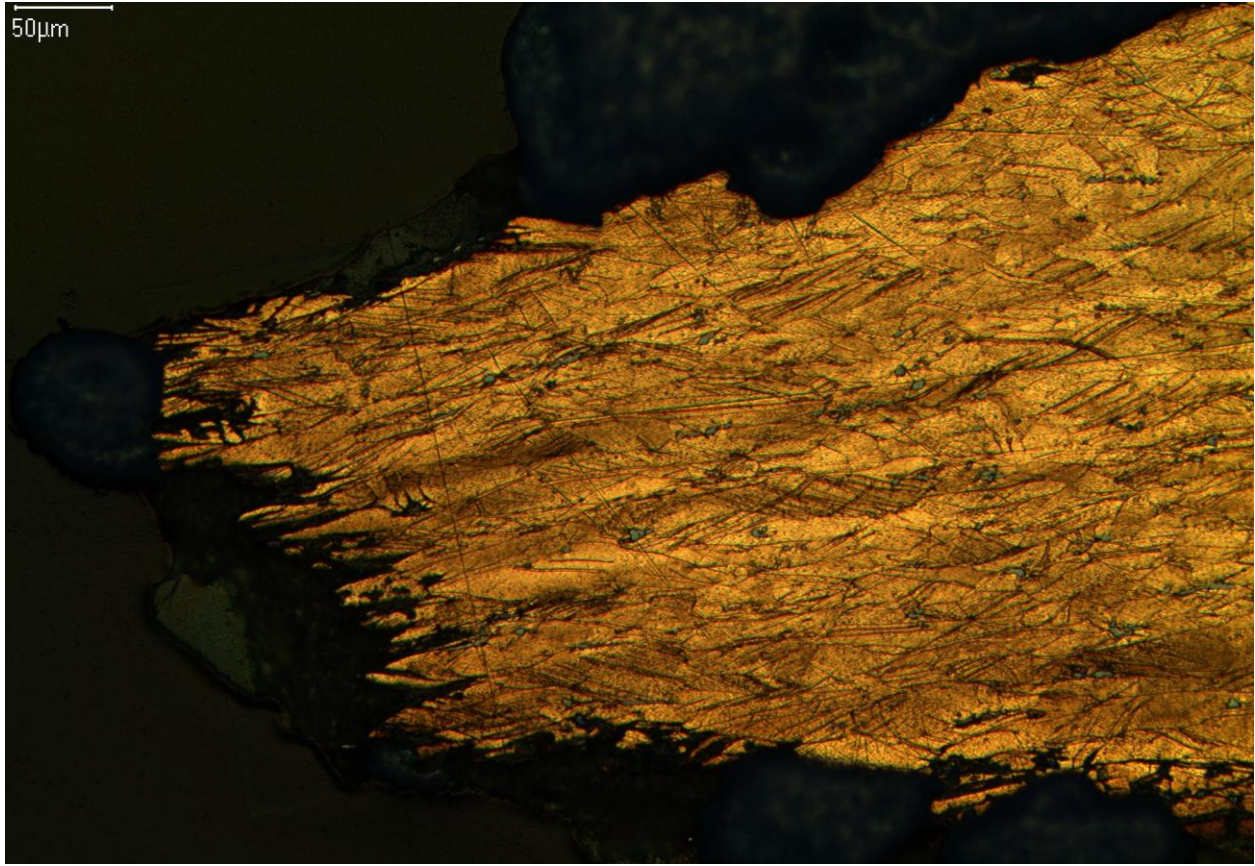


Figure 6 : détail de la coupe transversale du tranchant de 10334. Nous observons des grains polygonaux allongés et des macles mécaniques (Microscope optique en réflexion, attaque au FeCl_3).

Pointe de lance à languette rivetée 11102



Longueur totale : 171 mm	Epaisseur minimale de la languette: 3 mm
Longueur de la lame : 131 mm	Diamètre du trou de rivet : 3 et 4 mm
Largeur maximale de la lame : 28 mm	Poids : 88 g
Epaisseur maximale de la lame: 7 mm	

Cette pointe de lance a été trouvée dans le dépôt u du *champ aux d'offrandes* (Dunand, 1954 ; 384, 1950 ; pl. 125). La base de la languette présente un encochement en son milieu. La pointe de lance est recouverte de couches de corrosion de couleur gris sombre et vert sombre. Ces dépôts sont associés à des bubons, des croûtes terreuses. Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe longitudinale de la base de la languette.

L'échantillon présente des grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. La coupe (Fig. 7) présente un profil légèrement écrasé et d'aspect déchiré probablement provoqué par la même action qui a causé l'encochement. Dans ce cas, cette action de déformation serait survenue au cours de la mise en forme de l'objet par déformation. L'échantillon étant en état recristallisé, la dernière action qui aurait affecté la structure de cette partie serait un recuit. Le métal utilisé pour la fabrication de cette arme est un cuivre à 2 Wt.% d'arsenic.

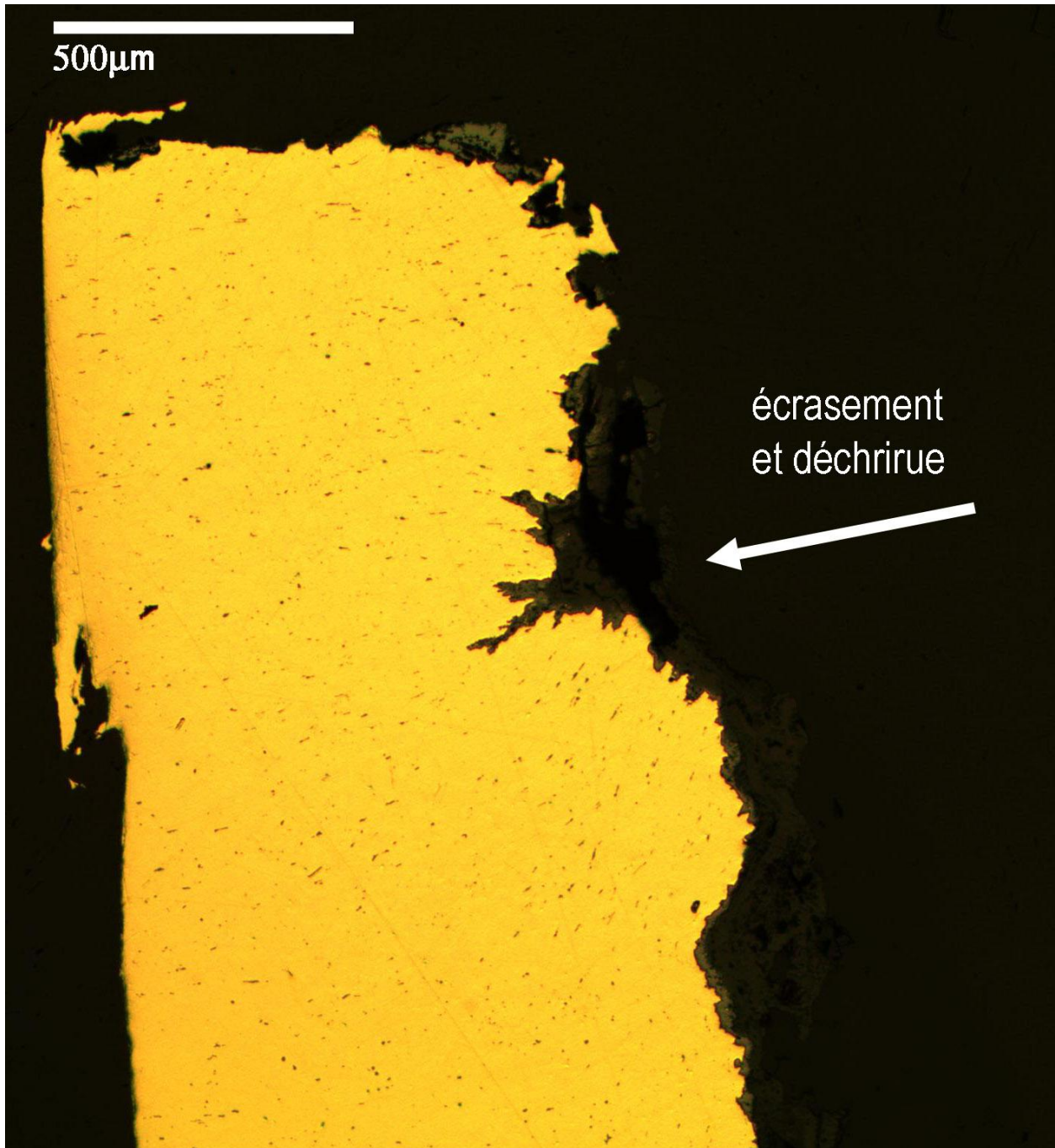


Figure 7 : coupe longitudinale de l'extrémité de la languette présentant un écrasement et une déchirure (Microscope optique en réflexion).

Pointe de lance à languette rivetée 11109



Longueur totale : 230 mm	Epaisseur minimale de la languette: 7 mm
Longueur de la lame : 191 mm	Diamètre du trou de rivet : 3, 3.5 et 4.5 mm
Largeur maximale de la lame : 41 mm	Poids : 198 g
Epaisseur maximale de la lame: 9 mm	

Cette pointe de lance a été trouvée dans le dépôt u du *champ aux d'offrandes* (Dunand, 1954 ; 384, 1950 ; pl. 125). Elle possède trois trous de rivet de diamètre variable. La languette présente une dissymétrie au niveau de sa partie inférieure. La lame est recouverte de couches hétérogènes de corrosion de couleurs gris clair et gris sombre associées à des croûtes terreuses et des bubons. Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe de la languette.

L'échantillon présente des grains polygonaux allongés, des macles mécaniques (Fig. 9 a) et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. La direction de l'allongement de la plupart des grains suit celle des surfaces externes de l'objet (Fig. 8). Au centre, l'allongement des grains est moins marqué. L'orientation de leurs axes longs ainsi que ceux des inclusions de sulfure de cuivre sont parallèles à l'axe de l'objet (Fig. 9 b). Cette arme est fabriquée à partir d'un cuivre à 1.5 Wt.% d'arsenic.

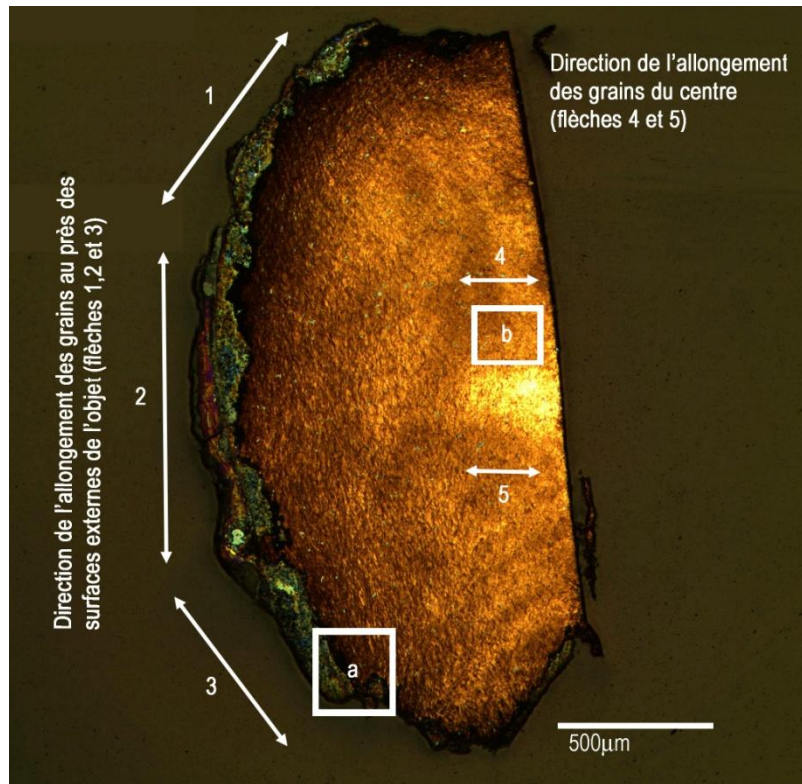


Figure 8 : coupe longitudinale de la languette présentant des grains polygonaux allongés. Dans le centre, l'allongement des grains est parallèle à l'axe de l'objet (flèches 4 et 5). Dans les parties périphériques, l'allongement suit la direction (flèches 1,2 et 3) du profil de la surface externe (Microscope optique en réflexion, Attaque FeCl_3).

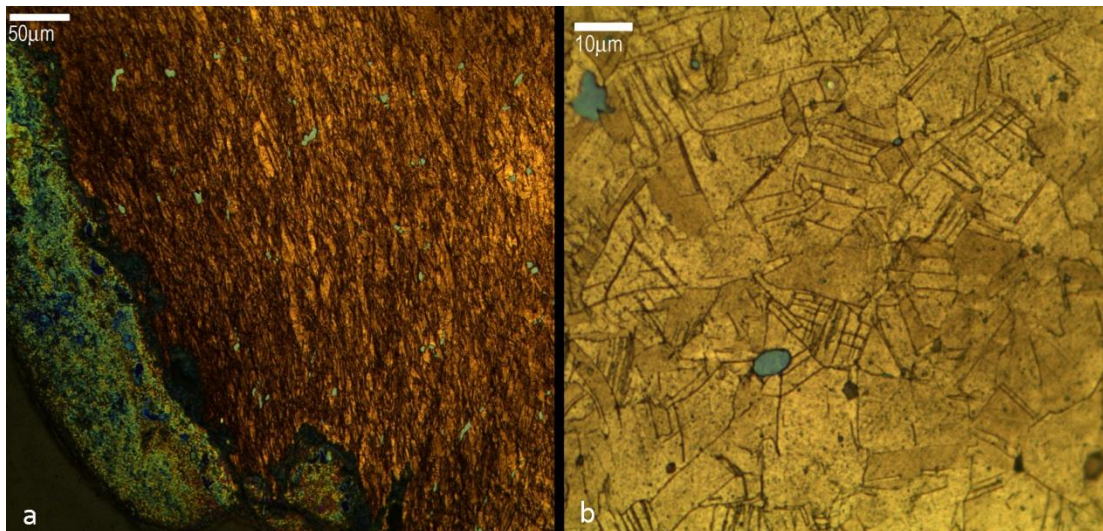


Figure 9 : a - Micrographie montrant la direction et l'allongement des grains dans une partie périphérique de la coupe de la languette (Fig. 8 carré « a »). b - Micrographie montrant l'allongement des grains dans le centre de la coupe de la languette (Fig. 8 carré « b ») (Microscope optique en réflexion, Attaque FeCl_3).

Pointe de lance à languette rivetée 11110



Longueur totale : 241 mm	Epaisseur minimale de la languette: 4 mm
Longueur de la lame : 197 mm	Diamètre du trou de rivet : 4 et 4.5 mm
Largeur maximale de la lame : 40 mm	Poids : 182 g
Epaisseur maximale de la lame: 9 mm	

Cette pointe de lance a été trouvée dans le dépôt u du *champ aux d'offrandes* (Dunand, 1954 ; 384, 1950 ; pl. 125). L'arme est recouverte d'une corrosion similaire à celles des autres pointes de lance provenant du même dépôt. Un échantillon a été prélevé de la lame pour observer la coupe du tranchant.

L'échantillon présente des grains polygonaux allongés, des macles mécaniques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. Le métal utilisé pour la fabrication de cette arme est un cuivre à 2 Wt.% d'arsenic.

Pointe de lance à languette rivetée 12320



Longueur totale : 190 mm	Epaisseur minimale de la languette: 3 mm
Longueur de la lame : 145 mm	Diamètre du trou de rivet : 6 et 7 mm
Largeur maximale de la lame : 37 mm	Poids : 98 g
Epaisseur maximale de la lame: 6 mm	

Cette pointe de lance a été trouvée dans le dépôt ε du champ aux offrandes (Dunand, 1954 ; 220). A la différence des languettes des armes précédentes présentant des sections transversales de forme rectangulaires, la section de la languette de cette arme est de forme hexagonale. L'arme est légèrement pliée au niveau de la languette. La corrosion a entraîné la perte d'une partie de son tranchant. La pointe de lance est recouverte de couches de corrosion de couleurs gris sombre, vert clair et vert sombre associées à des bubons, des croûtes terreuses et des crevasses. Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe du tranchant.

L'échantillon (Fig. 10) présente des grains polygonaux allongés, des macles mécaniques, des inclusions de sulfure de cuivre légèrement allongées, des nodules de plomb. L'alliage constituant cette arme est un bronze à 7 Wt.% d'étain et à 5 Wt.% de plomb.

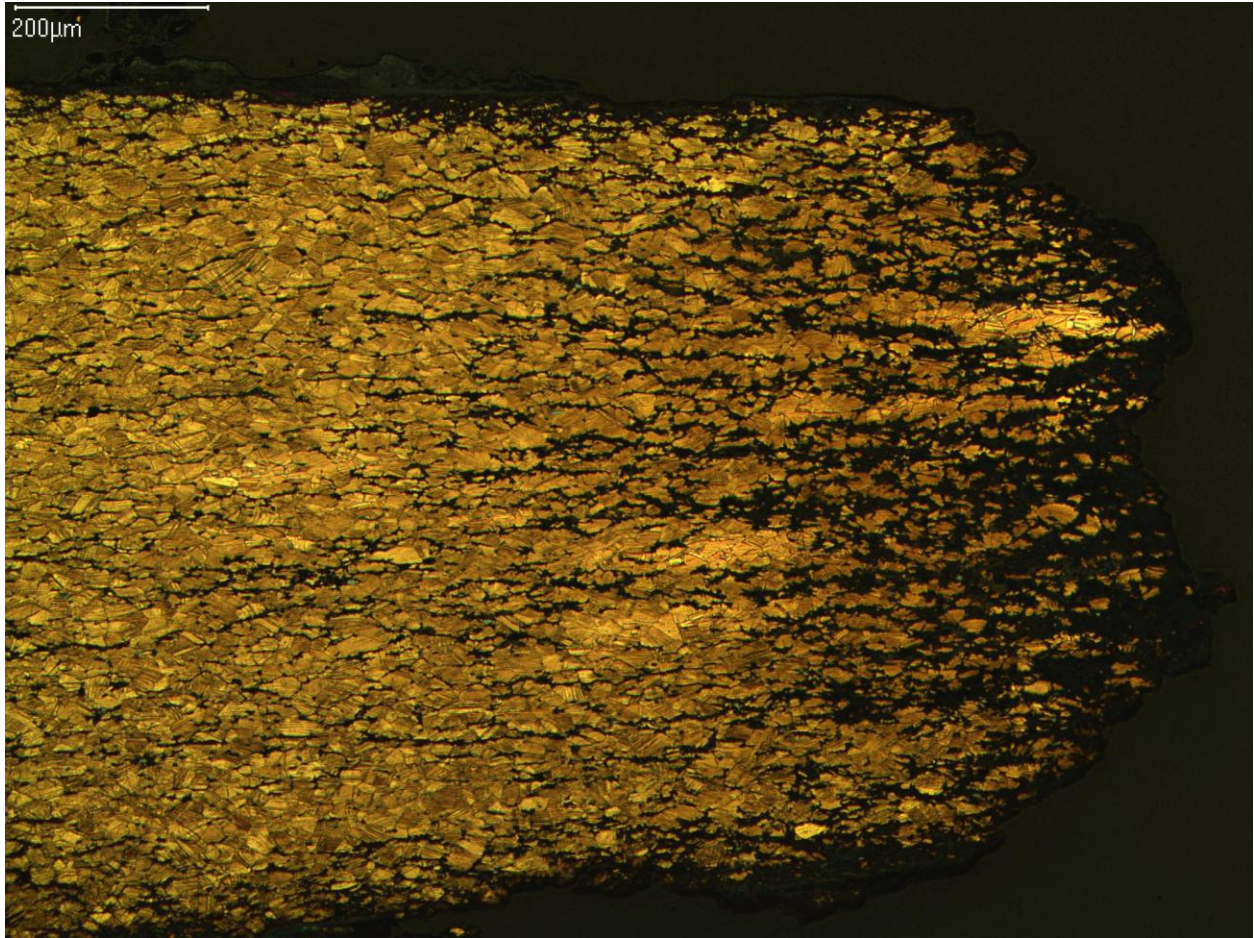


Figure 10 : coupe du tranchant présentant des grains polygonaux allongés et des macles mécaniques. (Microscope optique en réflexion, attaque au FeCl_3)

Pointe de lance à languette rivetée 12329



Longueur totale : 239 mm	Épaisseur minimale de la languette: 1 mm
Longueur de la lame : 181 mm	Diamètre du trou de rivet : 7 mm
Largeur maximale de la lame : 36 mm	Poids : 120 g
Épaisseur maximale de la lame: 6.5 mm	

Cette pointe de lance a été trouvée dans le dépôt ϵ du champ aux offrandes (Dunand, 1954 ; 220, 1950 ; pl. 110). La section de la languette de cette arme est de forme hexagonale. Suite à une restauration par bain d'acide, la lame a perdu une partie de son tranchant. L'arme est recouverte d'une fine couche homogène de corrosion de couleur brun sombre. L'action de la corrosion se manifeste aussi par des piqûres, des patelles et des crevasses. Ces dernières sont parfois remplies de produit de corrosion de couleur vert clair. Un échantillon a été prélevé pour observer une coupe transversale de la lame.

L'échantillon (Fig. 11) présente des grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées et fracturées. Le métal utilisé pour la fabrication de cette arme est un cuivre à 3 Wt.% d'arsenic. Il contient également de faible quantité de fer (0.3 Wt.%) et de soufre (0.2 Wt.%).

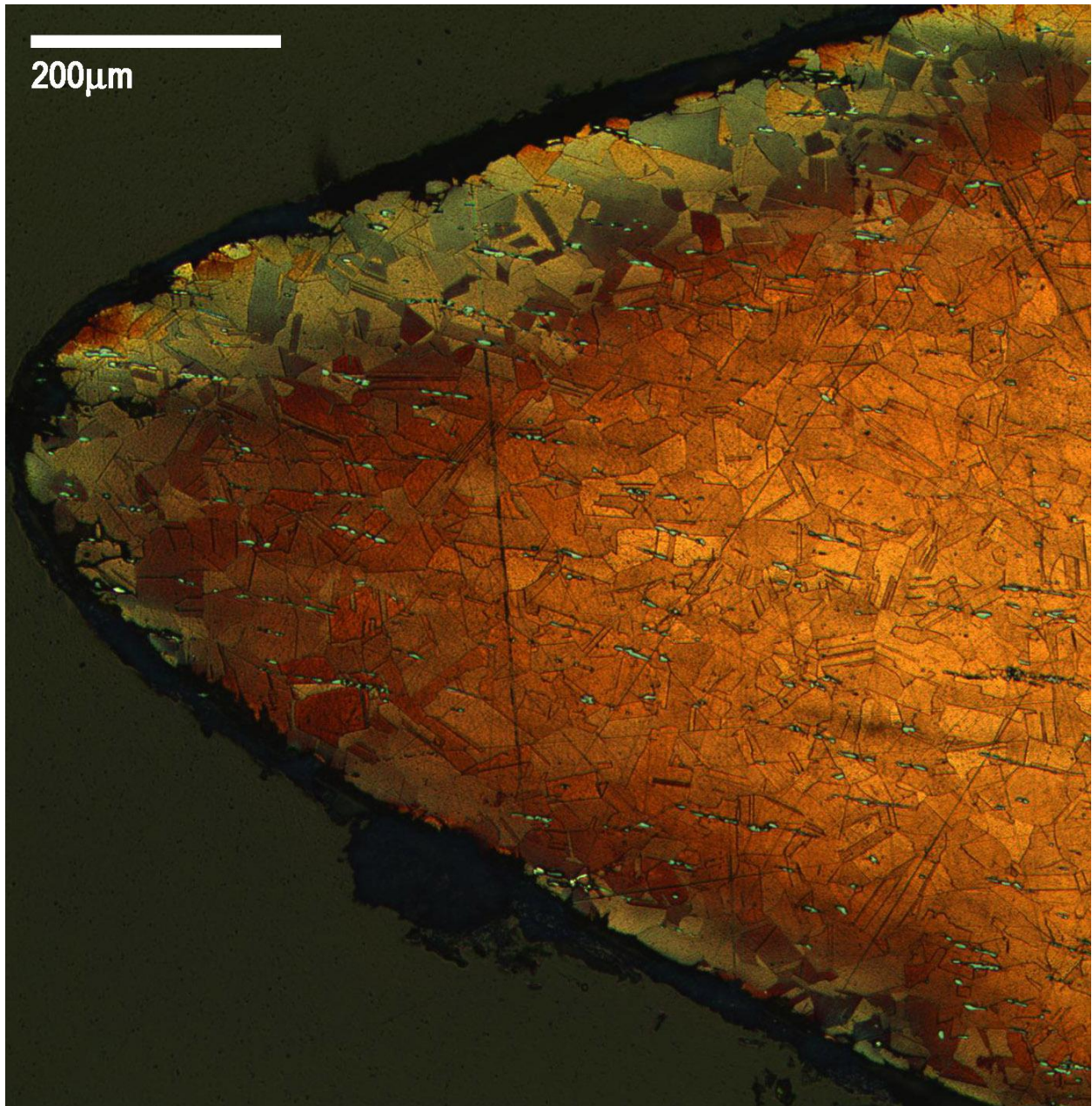


Figure 11 : coupe de la lame présentant des grains polygonaux équiaxes, des macles thermiques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées et fracturées (Microscope optique en réflexion, attaque au FeCl_3).

Pointe de lance à languette rivetée 12332



Longueur totale : 227 mm	Epaisseur minimale de la languette: 1.5 mm
Longueur de la lame : 182 mm	Diamètre du trou de rivet : 7 mm
Largeur maximale de la lame : 28 mm	Poids : 85 g
Epaisseur maximale de la lame: 5 mm	

Cette pointe de lance a été découverte dans le dépôt ε du champ aux offrandes (Dunand, 1954 ; 220, 1950 ; pl. 110). Des travaux de restauration ont entraîné la perte de plusieurs parties de la lame et de la languette. L'arme est recouverte d'une fine couche homogène de corrosion. Sur une des deux faces de l'arme la corrosion est de couleur brun sombre, tandis que sur l'autre face elle est de couleur vert sombre et clair. L'action de la corrosion se manifeste aussi par des piqûres, des patelles et des crevasses. Comme dans le cas précédent, ces dernières sont parfois remplies de produit de corrosion de couleur vert clair. Deux échantillons ont été prélevés pour observer une coupe de la nervure de la lame et une coupe de la languette comprenant un bord de trou de rivet.

L'échantillon prélevé de la languette (Fig. 12) présente des grains polygonaux équiaxes, des macles thermiques des nodules de plomb et des inclusions de sulfure de plomb. L'échantillon prélevé de la nervure présente des grains polygonaux légèrement allongés et des macles mécaniques. De la même façon, les nodules de plomb et les inclusions de sulfures de cuivre sont légèrement allongées (Fig. 13). L'alliage constituant cette arme est un bronze à 12 Wt.% d'étain. Il contient également 2 Wt.% de plomb.

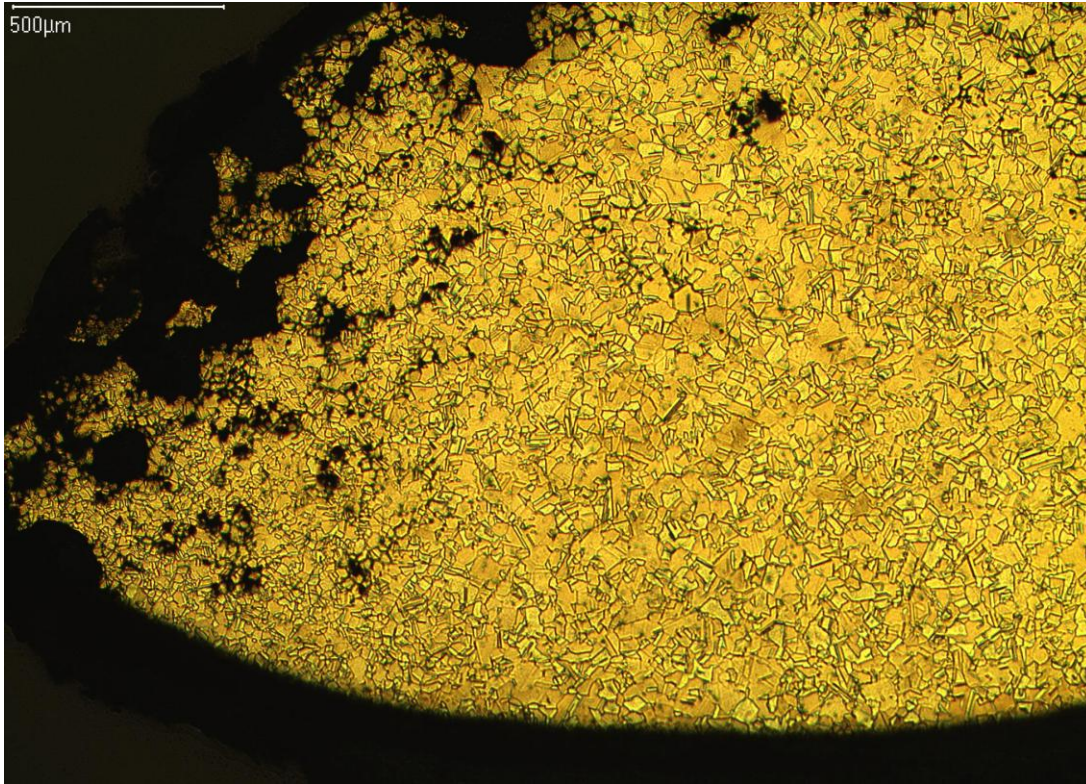


Figure 12 : coupe transversale de la languette révélant une structure de grains polygonaux équiaxes et des macles thermiques (Microscope optique en réflexion, attaque au FeCl_3).

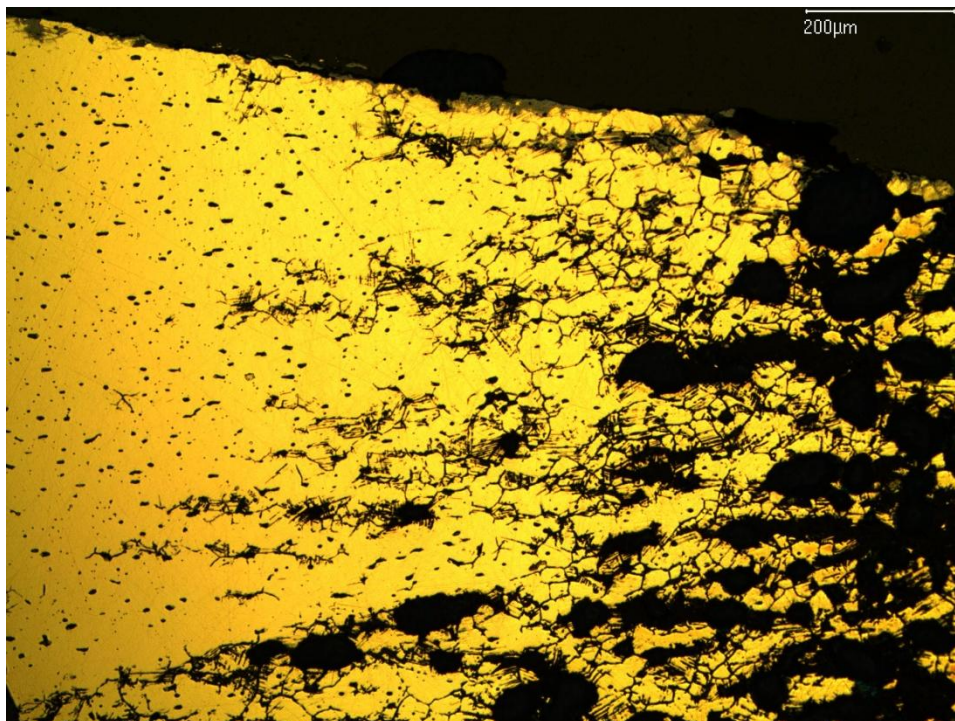


Figure 13: coupe transversale de la nervure présentant des inclusions de sulfure de cuivre et de nodules de plomb légèrement allongées (Microscope optique en réflexion)

Pointes de lances à douille longues

Pointe de lance à douille longue 9028



Long. totale : 246 mm	Ep. joint zone distale : 1.3 mm
Long. de lame : 183 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 31 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 14 mm	Ep. Opp.* joint zone distale: 0.6 mm
Dim. section douille : 16 x 22 mm	Ep. Opp.* joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 16 mm	Ep. Opp.* joint zone proximale :
Poids : 187 g	

*Mesure de la partie de la douille située à l'opposé du joint de la douille

Cette arme provient du dépôt λ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 303, 1950 ; 68). La lame est décorée par deux rainures longitudinales de part et d'autre de la nervure centrale. Une des 2 faces de l'arme est recouverte d'une couche homogène de couleur gris-vert clair. L'autre face est recouverte par une corrosion à dépôt foisonnant de couleur gris sombre et brun clair. Nous avons relevé sur l'ensemble de l'arme des bubons et des croûtes. L'extrémité supérieure de la lame est cassée. Il ne subsiste de la douille qu'une partie de la « zone distale ». Deux échantillons ont été prélevés pour observer les coupes longitudinales de la « zone distale » au niveau des surfaces du joint et du côté opposé au joint.

La douille présente une structure recristallisée. Sur toute la profondeur de la section des 2 échantillons examinés, les joints des grains et les plans de macles sont corrodés. Ainsi, les mesures de l'allongement des inclusions de sulfure de cuivre n'ont pas pu être réalisées. Nous pensons que les macles mécaniques sont le résultat de la déformation exercée au moment de la cassure de la douille. L'alliage utilisé est un bronze à 15 Wt.% d'étain. Aucune impureté n'a été détectée par EDXS.

Pointe de lance à douille longue 10268



Long. totale : 207 mm	Ep. joint zone distale : 1 mm (T.C)
Long. de lame : 117 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 25 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 12 mm	Ep. Opp. joint zone distale: 1 mm (T.C)
Dim. section douille : 19 x 19 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 95 g	

Cette arme provient du dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 187-188). Il ne subsiste de cet objet qu'une partie de la zone distale et de la lame. Elle est couverte par une corrosion à dépôt foisonnant principalement de couleur vert sombre. Ceux-ci sont associés à des crêtes vertes, des bubons et des croûtes terreuses. En raison de l'état corrodé de l'ensemble de l'objet, nous n'avons pas réussi à prélever des échantillons convenables pour l'observation métallographique. Ainsi cette pointe de lance n'a fait l'objet que d'analyses d'isotopes de plomb.

Pointe de lance à douille longue 10336



Long. totale : 199 mm	Ep. joint zone distale : 0.4 mm
Long. de lame : 150 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 25 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 11 mm	Ep. Opp. joint zone distale: 1 mm (T.C.)
Dim. section douille : 12 x 15 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 8 mm	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 85 g	

Cette arme provient du dépôt γ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 192 ; pl. 56). Elle est recouverte d'une couche épaisse de corrosion à dépôts foisonnants associée à des croûtes terreuses et des crêtes de couleur vert clair. Cette corrosion aurait fragilisé l'arme facilitant ainsi la cassure de plusieurs parties de la douille et du tranchant. Il ne subsiste de la douille que la partie supérieure de la « zone distale ». Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe et la surface de la « zone distale » supérieure du côté des surfaces de joint.

La « zone distale » supérieure présente une structure recristallisée ainsi que des macles mécaniques sur la surface. Ces dernières ont pu être produites par la cassure de la douille. Les inclusions de sulfure de cuivre suivent des directions parallèles, perpendiculaires et obliques à l'axe de l'objet. Elles présentent un facteur de forme de 4. Ces mesures ont été faites sur une parcelle rectangulaire de l'échantillon. Cette parcelle a une longueur de 1600 μm et une largeur de 1290 μm . L'épaisseur de l'échantillon varie entre 396 μm et 484 μm (section longitudinale). Parmi les inclusions de sulfure de cuivre mesurées 65 Wt.% sont perpendiculaires, 21 Wt.% parallèles et 14 Wt.% obliques à l'axe.

L'alliage utilisé est un bronze à 12 Wt.% d'étain contenant 3 Wt.% d'impuretés telles que le plomb présent sous forme de nodules ((Fig.1), l'arsenic, l'argent, le fer, le nickel et le soufre.

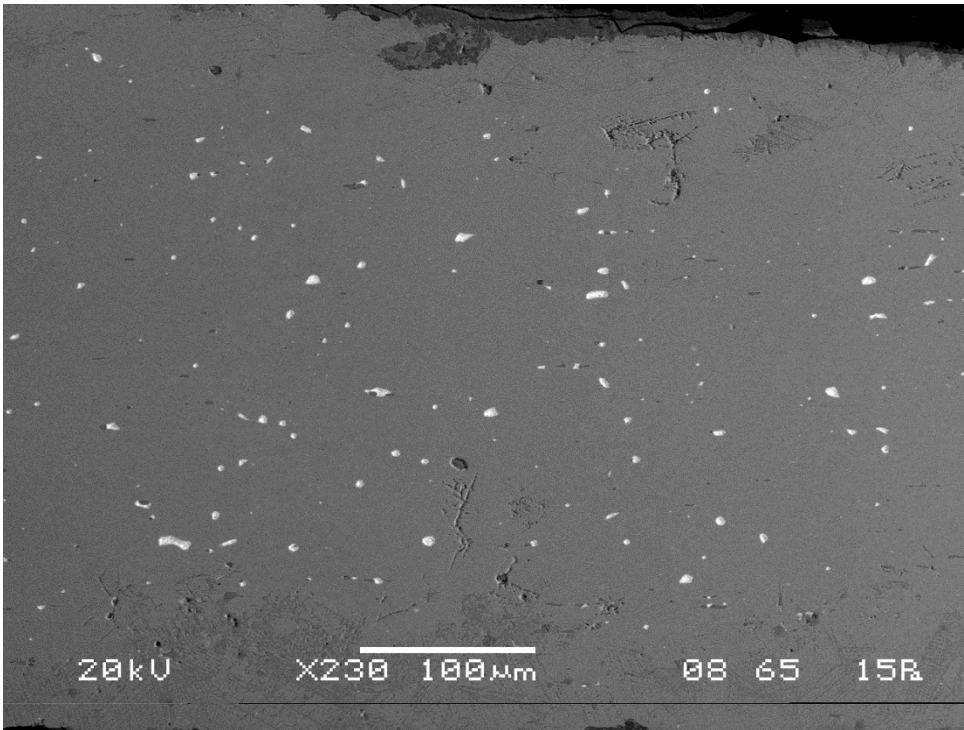


Figure 1: coupe de la « zone distale » présentant des nodules de plomb (en blanc) (Image MEB mode Shadow).

Pointe de lance à douille longue 11856



Long. totale : 404 mm	Ep. joint zone distale : 1.5 mm
Long. de lame : 184 mm	Ep. joint zone centrale : 0.5 mm
Larg. de lame : 30 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 12 mm	Ep. Opp. joint zone distale: 1 mm
Dim. section douille : 19 x 15 mm à 19x20 mm	Ep. Opp. joint zone centrale : 0.3 mm
Long. "partie fermée" : 4 mm	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 230 g	

Cette arme provient du dépôt ι du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 189). La lame est décorée par deux rainures longitudinales de part et d'autre de la nervure centrale. La pointe de la lame ainsi qu'une partie de la « zone proximale » de la douille manquent. La « zone proximale » qui subsiste comporte de nombreuses fissures. Une cassure au niveau de la « zone distale » a détaché la douille de l'arme. L'objet est recouvert d'une corrosion de texture fine et de couleur gris sombre. Nous avons également détecté des croûtes terreuses, des bubons et des croûtes de couleur vert et gris clair sur toutes les parties de l'arme. Suite à une corrosion locale, le centre de la lame a subi une augmentation de volume entraînant ainsi des fissurations au niveau du tranchant. Quatre échantillons ont été prélevés pour observer les coupes et les surfaces de la « zone distale » et de la « zone proximale ». Un cinquième échantillon a été prélevé pour effectuer des analyses des isotopes de plomb.

La douille présente une structure recristallisée avec des nodules de seconde phase (Fig. 2 et 3). Sur 3 des 4 échantillons examinés, La corrosion a atteint les joints des grains et des plans de macles sur toute la profondeur de la section de la douille. Les macles mécaniques résultent probablement de la déformation exercée au moment de la cassure de la douille. Les inclusions de sulfure de cuivre sont de petites dimensions. Au niveau de la « zone distale » les inclusions de sulfure de cuivre observées sur les « surfaces de joint » sont parallèles à l'axe de l'objet. Ils présentent un facteur de forme de 1.5 ($f_{f\text{ moy.}}$). Ils ont été mesurés sur une surface rectangulaire de l'échantillon. Sa longueur est de 4500 μm et sa largeur de 2980 μm . L'épaisseur de l'échantillon varie entre 941 μm et 814 μm (en section longitudinale). Le côté opposé au joint présente des inclusions de sulfure de cuivre de facteur de forme 2 ($f_{f\text{ moy.}}$), majoritairement obliques à l'axe. Ils ont été mesurés sur une surface triangulaire de l'échantillon. Cette

surface a une hauteur de 4990 μm et une base de 2290 μm . L'épaisseur de l'échantillon varie entre 1460 μm et 1060 μm (en section longitudinale).

Au niveau de la « zone proximale » les inclusions de sulfure de cuivre dans les « surfaces de joint » n'ont pas pu être mesurées à cause de la corrosion. Le côté opposé au joint présente des inclusions de sulfure de cuivre parallèles et obliques à l'axe. Le facteur de forme dans les 2 directions est de 6 ($f_{f\text{ moy.}}$). Ils ont été mesurés sur une surface rectangulaire de l'échantillon. Sa longueur est de 4150 μm et sa largeur de 2420 μm . L'épaisseur de l'échantillon varie entre 240 μm et 250 μm (en section longitudinale). Le métal utilisé pour la fabrication de l'objet est un bronze à 14 Wt.% d'étain. Très peu d'impuretés (<0.5%) ont été détectées par EDXS.

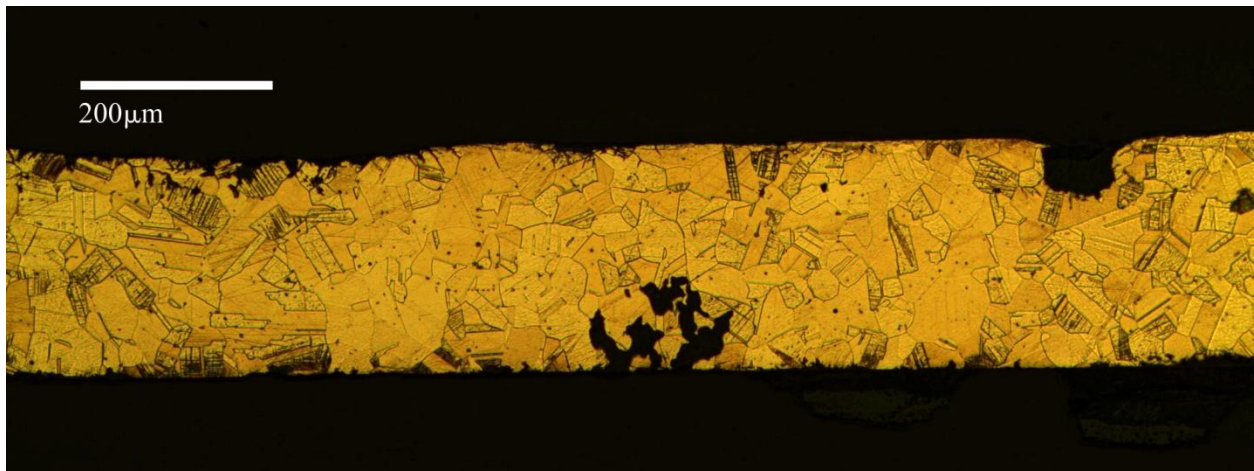


Figure 2 : coupe de la « zone proximale » du côté opposé au joint présentant une structure recristallisée (Microscope optique en réflexion, Attaque FeCl_3).

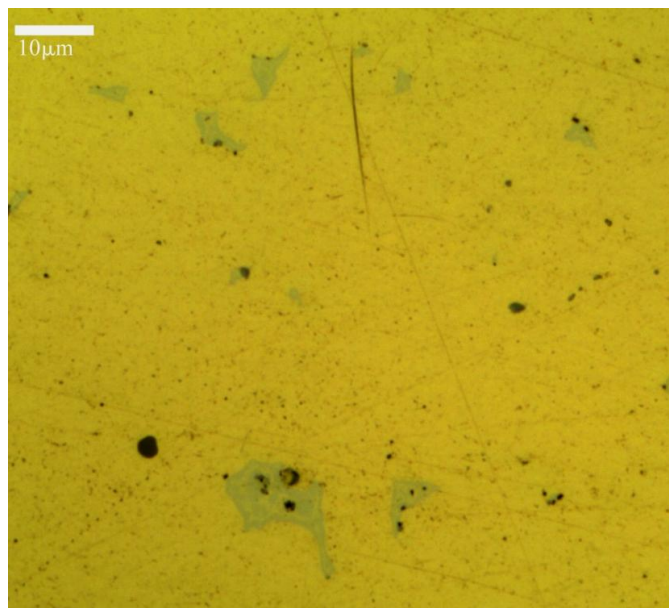


Figure 3 : surface de la « zone proximale » du côté opposé au joint présentant des formations de seconde phase (Microscope optique en réflexion).

Pointe de lance à douille longue 11913¹



Long. totale : 453 mm	Ep. joint zone distale : 2 mm (T.C)
Long. de lame : 184 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 36 mm	Ep. joint zone proximale : 1 mm (T.C)
Ep. Max. de la lame : 18 mm	Ep. Opp. joint distale: 2 mm (T.C.)
Dim. section douille : 20 x 20 mm à 28 x 20 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 29 mm	Ep. Opp. joint zone proximale : 1mm (T.C.)
Poids : 399 g	

Cette arme appartient au dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 189). La douille est en état fragmentaire et la lame a perdu sa pointe. L'arme a subi plusieurs fissurations ainsi qu'une augmentation du volume due à l'action de la corrosion. Celle-ci recouvre l'ensemble de l'objet. Elle est constituée de dépôts foisonnant de couleurs vert clair, gris sombre et vert sombre. Un fragment de la « zone proximale » présente un trou de fixation. L'état dégradé de la pointe de lance n'a pas permis l'examen de la microstructure. Cependant, un échantillon a tout de même été prélevé pour effectuer des analyses des isotopes du plomb.

¹ Les clichés des armes n° 11913, 11914 et 11921 sont de G. Gernez

Pointe de lance à douille longue 11914



Long. totale : 484 mm	Ep. joint zone distale : 2 mm (T.C.)
Long. de lame : 167 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 36 mm	Ep. joint zone proximale : 1mm (T.C.)
Ep. Max. de la lame : 15 mm	Ep. Opp. joint distale: 2 mm (T.C.)
Dim. section douille : 22 x 21 mm à 26 x 22 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 25 mm	Ep. Opp. joint zone proximale : 1mm (T.C.)
Poids : 344 g	

Cette arme a été découverte dans le dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 189). La lame est recourbée au niveau de son extrémité supérieure. Deux rainures décorent la lame de part et d'autre de la nervure centrale. L'arme est recouverte d'une corrosion rugueuse à dépôts foisonnants de couleur vert-gris clair. Elle est associée à des croûtes et des bubons. Certaines parties de l'objet comme la lame et les « surfaces du joint » de la douille ont subi des fissurations ainsi qu'une augmentation considérable de volume à cause de la corrosion. La majorité de la douille est en état fragmentaire. Deux échantillons (Fig. 4) ont été prélevés pour observer la coupe et la surface de la « zone proximale » de la douille. Un échantillon supplémentaire à été prélevé pour effectuer des analyses des isotopes du plomb.

L'alliage utilisé est un bronze à 14 Wt.% d'étain. Il contient quelques inclusions de nodules de plomb, observées mais non détectées par les analyses. La corrosion inter-granulaire a révélé, dans les échantillons, une structure recristallisée dont les grains sont équiaxes (Fig. 5). Le facteur de forme n'a pas pu être calculé à cause de la difficulté de distinguer les inclusions de sulfure de cuivre de la corrosion.



Figure 4: localisation des deux échantillons prélevés de la « zone proximale ».

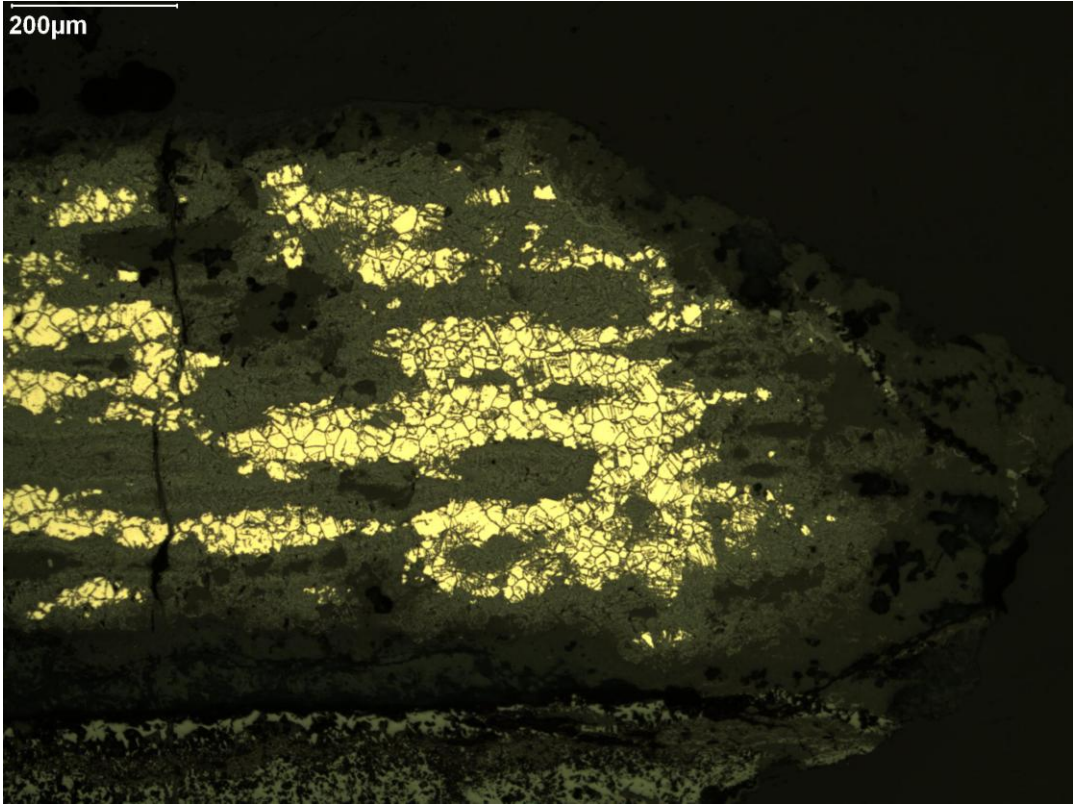


Figure 5 : structure cristalline de l'échantillon "1" révélée par la corrosion (Microscope optique en réflexion)

Pointe de lance à douille longue 11921



Long. totale : 555 mm	Ep. joint zone distale : 4 (T.C.)
Long. de lame : 215 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 32 mm	Ep. joint zone proximale : 2 (T.C.)
Ep. Max. de la lame : 21 mm	Ep. Opp. joint distale: 6 mm (T.C.)
Dim. section douille : 23 x 21 mm à 25 x 20 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp. joint zone proximale : 1mm (T.C.)
Poids : 465 g	

Cette arme provient du dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 189). Comme dans le cas des trois autres pointes de lance à douille longues appartenant au même dépôt d'offrandes, l'action de la corrosion a provoqué la fragmentation et la fissuration de l'arme ainsi qu'une augmentation du volume. C'est pourquoi cet objet a fait l'objet d'analyses des isotopes du plomb uniquement.

Pointe de lance à douille longue 26756



Long. totale : 396 mm	Ep. joint zone distale : 2.5 (T.C.)
Long. de lame : 216 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 39 mm	Ep. joint zone proximale : 2.5 mm(T.C.)
Ep. Max. de la lame : 14 mm	Ep. Opp. joint distale: 2.5 mm (T.C.)
Dim. section douille : 19 x 19 mm à 26 x 20 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp. joint zone proximale : 1mm (T.C.)
Poids : 290 g	

Cette pointe de lance à été retrouvée dans la tombe 14.14 à Tell Arqa (Thalmann 2006 ; 35 ; fig. 8). Elle est associée à une pointe de lance à douille courte, un poignard à lame décorée et à une hache fenestrée étroite. Elle présente une nervure centrale étroite par rapport aux pointes de lances à douille longues de Byblos. Une grande partie de la douille est détachée de l'objet. Un objet en métal blanc non-ferreux, interprété comme étant une fiole par les archéologues, est collée la « zone proximale ». Des restes osseux du squelette de l'individu enterré dans la tombe sont attachés sur l'extrémité de la lame. La restauration de l'arme a mis en évidence une couche homogène à texture fine de couleur vert sombre associé à des patelles et de piqûres. La douille présente une corrosion de type lamellaire. La corrosion de la lame a fragilisé le tranchant favorisant ainsi le détachement de plusieurs bouts de cette partie. Trois prélèvements d'échantillons ont été effectués pour observer la surface et la coupe de la douille ainsi que la coupe du tranchant. Finalement, seul l'échantillon prélevé du tranchant a pu être analysé (Fig. 6) en raison de l'état corrodé des deux autres.

Le métal utilisé est un bronze à 12 Wt.% d'étain. L'infiltration de la corrosion dans la structure cristalline a révélé un état écroui avec des grains polygonaux présentant des macles mécaniques (Fig. 7). Les grains de la partie intérieure du tranchant sont équiaxes. Ils s'allongent progressivement pour atteindre un facteur de forme de l'ordre de 4 à l'extrémité du tranchant. L'allongement représente l'effet de la dernière déformation qu'a subi la lame. Cette action est liée au travail d'amincissement et possiblement de l'affûtage du tranchant. Les inclusions de sulfure de cuivre sont attestées en grande quantité. Leur facteur de forme mesuré sur la coupe transversale évolue de 38 à l'intérieur du tranchant jusqu'à 51 à l'extrémité. Ces facteurs de forme représentent la déformation totale qu'a subie cette partie de la lame. Outre la dernière déformation, l'extrémité du tranchant a été plus déformée que sa base. L'examen de la coupe transversale du tranchant (Fig. 6) montre que cette partie de la lame a subi une augmentation de volume due à la corrosion.

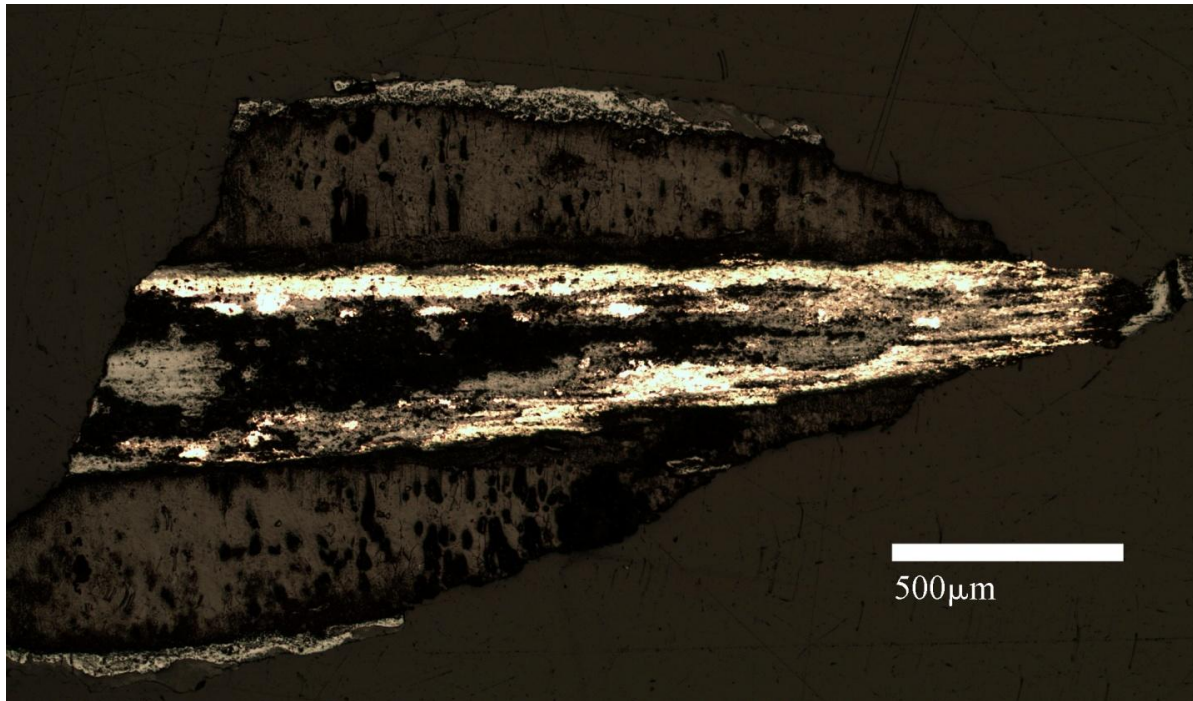


Figure 6 : coupe du tranchant (en clair) entourée par une épaisse couche de corrosion (Microscope optique en réflexion). Notons que l'extrémité du tranchant (à droite de l'image) est mieux conservée que sa base (à gauche de l'image).

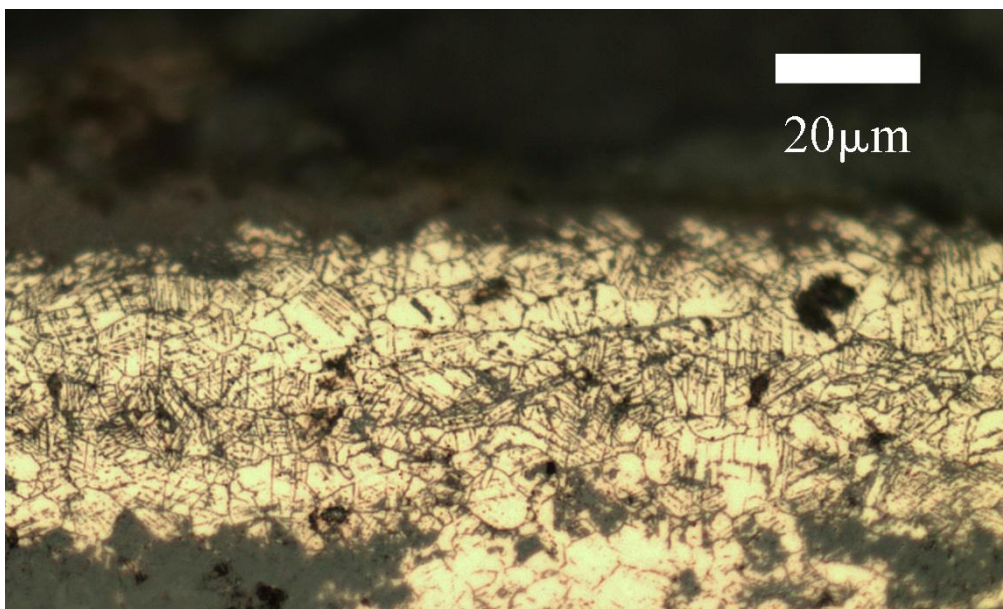


Figure 7 : structure cristalline écroûie du bout du tranchant : les grains sont allongés et présentent des macles mécaniques (Microscope optique en réflexion).

Pointe de lance à douille longue 27855



Long. totale : 260 mm	Ep. joint zone distale : 1 mm
Long. de lame : 195 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 32 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 11 mm	Ep. Opp. joint distale: 1 mm
Dim. section douille : 19 x 15 mm à 19 x 18 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 6 mm	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 187 g	

Cette arme provient du dépôt λ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 300, 1950 ; pl. 68). L'objet est en bon état de conservation, mais la majorité de sa douille manque. La lame est décorée d'un couple de rainures de part et d'autre de la nervure (Fig.8). Des stries de polissage ou d'affûtage, parallèles à l'axe long de l'objet, sont visibles sur quelques parties de la lame. Le tranchant a une forme en double biseau. L'arme est recouverte d'une couche de corrosion homogène de texture fine et de couleur gris sombre. A part une croûte sur la « zone distale » de la douille, la corrosion locale est peu volumineuse. Elle est constituée de bubons de couleur vert sombre et vert clair. Nous trouvons également des plages de texture fine et de couleur brun clair moins étendues que celle de couleur gris sombre. Deux échantillons ont été prélevés pour étudier la surface et la coupe du milieu de la « zone distale » de la douille. Un autre échantillon a été prélevé afin de déterminer la provenance du cuivre par analyses des isotopes du plomb.

L'alliage utilisé est un bronze à 12 Wt.% d'étain. Nous n'avons pas détecté d'impuretés par EDXS. Cependant nous avons pu observer quelques sulfures de cuivre et des nodules de plomb. La douille présente une structure recristallisée avec des grains équiaxes, des fissurations et des formations de seconde phase (Fig.9). Les inclusions de sulfure de cuivre sont allongées. Dans la « surface de joint » de la « zone distale » ils sont parallèles à l'axe de l'objet. Le facteur de forme moyen ($f_{f\text{ moy.}}$) est de l'ordre de 4. Ces mesures ont été réalisées sur une surface carrée de l'échantillon de 1940 μm de côté. L'épaisseur de l'échantillon varie autour de 1000 μm (section longitudinale). Dans la « zone distale » du côté opposé au joint les inclusions sont majoritairement obliques à l'axe de l'objet. Le facteur de forme ($f_{f\text{ moy.}}$) est de l'ordre de 5. Elles ont été mesurées sur une surface polygonale de l'échantillon. Sa

longueur maximale est de 2580 μm et sa largeur maximale de 1600 μm . L'épaisseur de l'échantillon varie autour de 950 μm (section longitudinale).



Figure 8 : La décoration en double rainures sur le côté de la nervure.

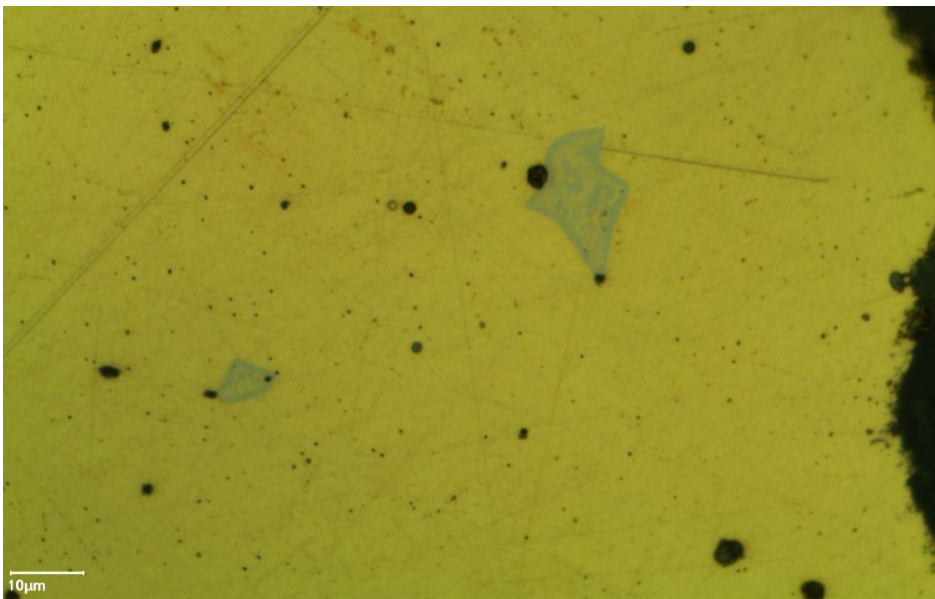


Figure 9 : détail de la coupe transversale de la « surface de joint » présentant deux inclusions de seconde phase ($\alpha+\beta$) riche en étain (Microscope optique en réflexion).

Pointe de lance à douille longue 27856



Long. totale : 296 mm	Ep. joint zone distale : 1.5 mm
Long. de lame : 183 mm	Ep. joint zone centrale : 0.8 mm
Larg. de lame : 29 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 9 mm	Ep. Opp. joint distale: 1 mm
Dim. section douille : 17 x 17 mm	Ep. Opp. joint zone centrale : 0.5 mm
Long. "partie fermée" : 7 mm	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 137 g	

Cette arme provient du dépôt λ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 303, 1950 ; pl. 68). La lame est décorée d'une seule rainure de part et d'autre de la nervure. Elle présente quelques dissymétries au niveau de la pointe. Les zones « centrale » et « proximale » de la douille ainsi qu'une large partie de la « zone distale » manquent. Sur une des deux faces de l'arme nous observons une conservation partielle de la surface originelle au niveau de la lame. La pointe de lance est recouverte d'une couche homogène de texture fine et de couleur gris-sombre. Nous observons également des plages de texture fine ou peu rugueuse moins étendues et de couleur gris clair, vert et brun clair ainsi que de la corrosion localisée constituée de bubons et de patelles. Deux échantillons ont été prélevés pour observer la coupe et la surface de la partie inférieure de la « zone centrale » du côté du joint (Fig.10). Un troisième a subi des analyses des isotopes du plomb.

L'alliage utilisé est un bronze à 12 Wt.% d'étain. L'alliage contient des nodules de seconde phase, des fissurations, des nodules de plomb et des inclusions de sulfure de cuivre. La structure de la douille est recristallisée. Ses grains équiaxes présentent parfois des macles thermiques et mécaniques (Fig.12). La présence de ces dernières peut être due à des travaux de finition comme le polissage ou bien à des contraintes imposées au moment de la cassure de la douille. Les inclusions de sulfure observées sur la « surface de joint » de la « zone centrale » de cuivre sont allongées et parallèles à l'axe de l'objet avec un facteur de forme de l'ordre de 11 (f_f moy.). L'étude de ces inclusions a été réalisée sur une surface triangulaire de l'objet. Sa hauteur est de 3550 μm et sa base de 4030 μm. L'épaisseur de l'échantillon varie autour de 600 μm.

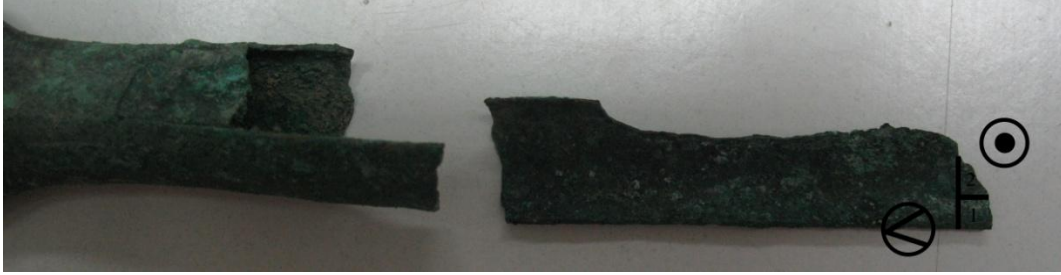


Figure 10 : localisation des deux prélèvements sur la partie détachée de la douille. Le prélèvement 1 correspond à la « surface de joint » de la douille.

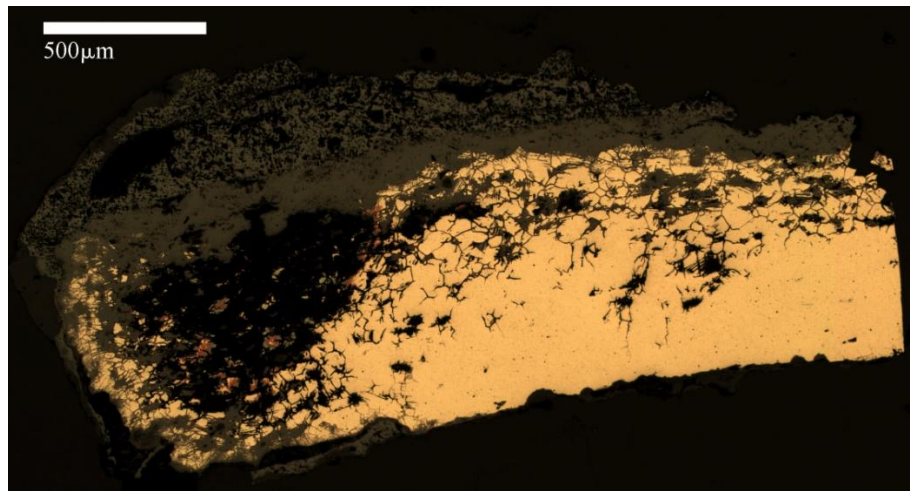


Figure 11 : section de la « surface de joint » de douille du prélèvement « 1 » (Microscope optique en réflexion).

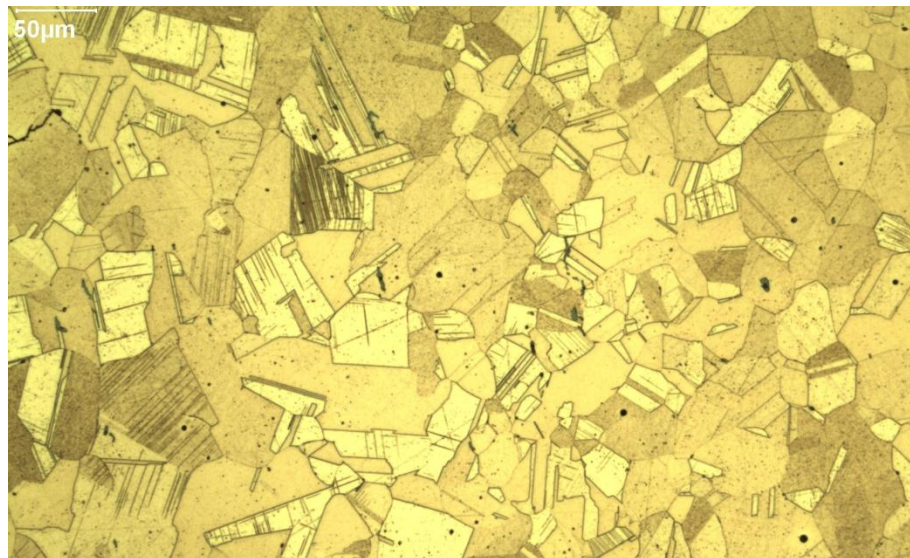


Figure 12 : structure recristallisée de la surface de la douille (prélèvement 2) avec des grains équiaxes présentant des macles mécaniques et thermiques (Microscope optique en réflexion, attaque au FeCl_3).

Pointe de lance à douille longue 27884



Long. totale : 225 mm	Ep. joint zone distale : 1.2 mm
Long. de lame : 143 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 26 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 10 mm	Ep. Opp. joint distale: 1 mm
Dim. section douille : 16 x 14 mm à 17 x 16 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 34 mm	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 138 g	

Cette arme provient du dépôt λ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 301, 1940 ; 67). La lame est décorée par une rainure longitudinale de part et d'autre de la nervure centrale. La pointe de la lame ainsi que la « zone centrale » et « proximale » de la douille manquent. L'arme est recouverte d'une corrosion homogène rugueuse de couleur vert sombre. Nous avons détecté des croûtes terreuses, des bubons, des patelles et des plages rugueuses de couleurs vert et gris claire sur toutes les parties de l'arme. La corrosion locale a fragilisé le tranchant entraînant ainsi plusieurs cassures au niveau de cette partie. Une plaque en argent est associée à cette pointe de lance. Nous n'avons pas réussi à définir la relation exacte entre l'arme et la plaque. Cette dernière aurait été fixée sur la hampe par des clous en alliage cuivreux. Sa surface extérieure est recouverte par une corrosion homogène de texture rugueuse et de couleur gris sombre et sa surface intérieure d'une couche homogène fine de couleur blanche. Deux échantillons ont été prélevés pour observer la surface et les coupes de l'extrémité inférieure de la « zone distale ». La feuille en argent a fait aussi l'objet d'un prélèvement pour des études en coupe métallographique. De plus l'arme a fait l'objet d'une étude de provenance par analyses des isotopes de plomb.

La douille présente une structure recristallisée avec des nodules de seconde phase et des fissurations (Fig. 13). Les inclusions de sulfure de cuivre sont de petites dimensions. Au niveau de la « zone distale » les inclusions de sulfure de cuivre de la « surfaces de joint » sont parallèles à l'axe de l'objet. Ils présentent un facteur de forme de 3 ($f_{f moy.}$). Ils ont été mesurés sur une parcelle triangulaire de l'échantillon. Cette parcelle présente une hauteur de 6300 μm et une base de 2500 μm . L'épaisseur de l'échantillon varie entre 1230 μm et 1140 μm (en section longitudinale).

Le côté opposé au joint présente des inclusions de sulfure de cuivre parallèles de facteur de forme 8 ($f_{f moy.}$) et d'autres perpendiculaires ou obliques à l'axe de facteur de forme 5 ($f_{f moy.}$). Parmi les inclusions de sulfure de cuivre mesurées, 45 Wt.% sont obliques, 34 Wt.% sont perpendiculaires et 8 Wt.% sont parallèles. Les 13 Wt.% restant sont des sulfures de cuivres qui ne présentent pas d'allongement. Ces mesures ont été appliquées sur une parcelle allongée de l'échantillon ayant une longueur de 4500 μm et une largeur de 3390 μm . L'épaisseur de l'échantillon varie entre 824 μm et 1100 μm (en section transversale).

Le métal utilisé pour la fabrication de l'objet est un bronze à 15 Wt.% d'étain. Nous n'avons pas détecté d'impuretés par EDXS.

La plaque d'argent présente une épaisseur de 150 μm . Sa structure est dans un état recristallisé (Fig. 14) avec des grains polygonaux équiaxes et des macles thermiques. Le métal contient 95.5 Wt.% d'argent, du cuivre à 3 Wt.%, du plomb à 1 Wt.%.

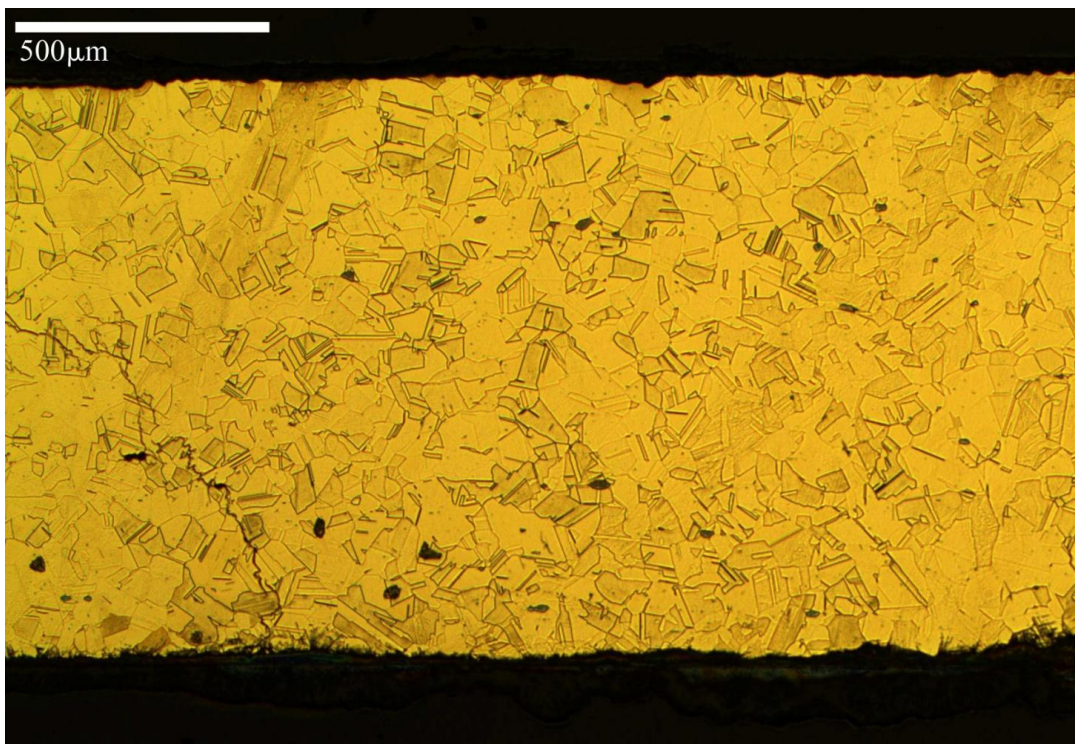


Figure 13 : coupe longitudinale de la « zone distale » du côté des surfaces de joint présentant une structure recristallisée. (Microscope optique en réflexion, Attaque FeCl_3).

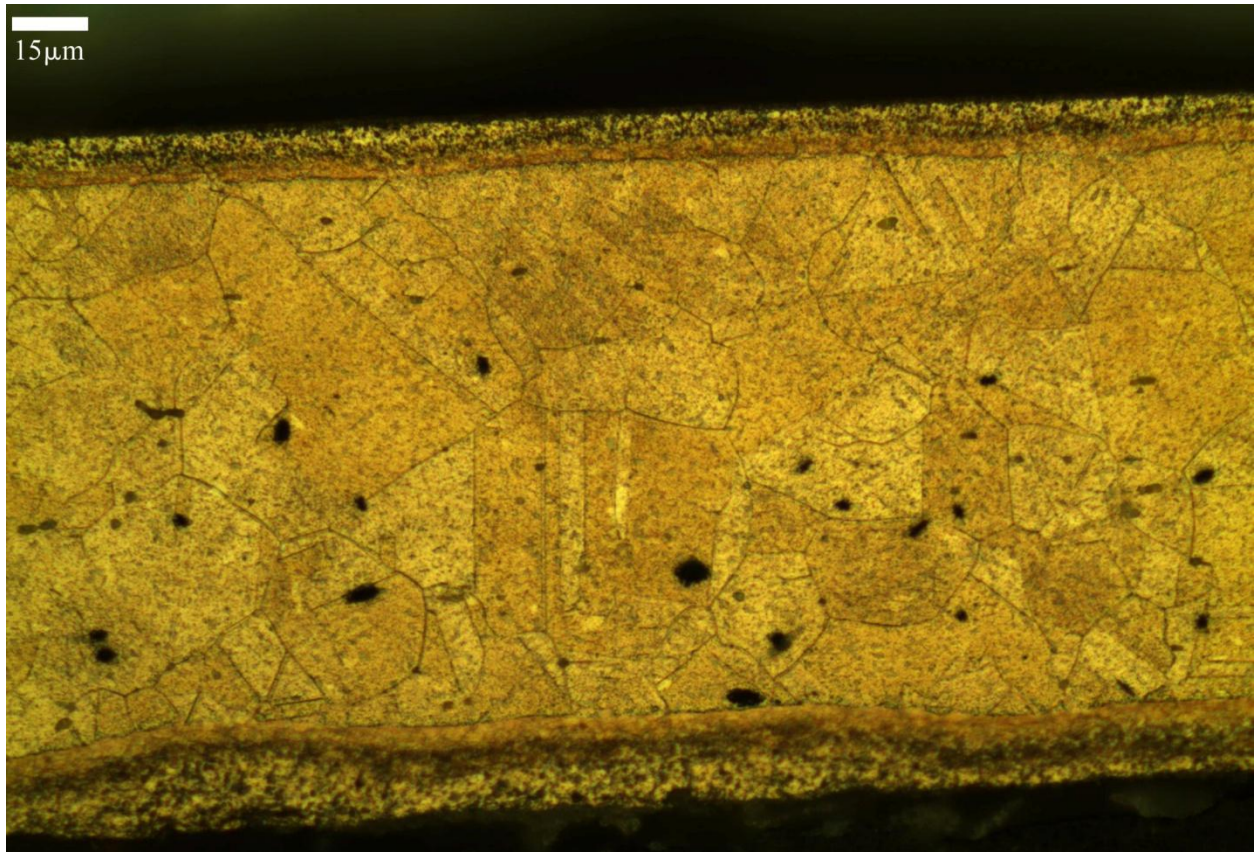


Figure 14 : coupe de la plaque en argent présentant une structure recristallisée (Microscope optique en réflexion, Attaque Solution acide de Dichromate de potassium).

Pointes de lances à douille moyennes

Pointe de lance à douille moyenne 10870



Long. totale : 216 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 116 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 35 mm	Ep. joint zone proximale : 1.5 mm
Ep. Max. de la lame : 11 mm	Ep. Opp.* joint zone distale:
Dim. section douille : 19 x 13 mm à 23 x 23 mm	Ep. Opp.* joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 6 mm	Ep. Opp.* joint zone proximale : 1 mm
Poids : 200 g	

*Mesure de la partie de la douille située à l'opposé du joint de la douille

Cette pointe de lance a été découverte dans le carré 8/12 durant la démolition des murs de la levées XI jusqu'à XV (Dunand, 1954 ; 630 ; fig. 714). L'arme est recouverte d'une couche homogène de corrosion fine de couleur gris sombre. Nous observons également des crevasses de grandes dimensions et de couleur vert clair. Le bord de son tranchant est irrégulier et la partie inférieure de la « zone proximale » a subi plusieurs cassures causant la perte de quelques fragments. Celle-ci présente deux trous de fixation. Nous avons prélevé un échantillon sur la bordure déjà fracturée de l'un d'entre eux. Cet échantillon nous permet d'observer la coupe perpendiculaire de la bordure du trou ainsi que la surface de la « zone proximale ».

L'échantillon présente une structure recristallisé au niveau de la zone distale avec des grains polygonaux équiaxes (Fig.3). La bordure du trou de fixation présente un aspect évasé (Fig. 1). La structure cristalline associée est constituée des grains polygonaux allongés avec des macles mécaniques. L'allongement de ces grains écrouis suit la courbe du trou (Fig.2). Nous constatons alors que le perçage du trou a eu lieu dans la dernière phase de conception de l'objet, après le martelage et la mise en forme de la douille.

Les inclusions de sulfure de cuivre dans la « zone proximale » à proximité du trou¹ de fixation sont perpendiculaires et obliques par rapport à l'axe avec un facteur de forme de 4. Ils ont été mesurés sur une parcelle pentagonale de 5650 μm de longueur maximale, 4510 μm de largeur maximale et pour une épaisseur qui varie entre 560 μm et 810 μm . Le métal utilisé pour la fabrication de cette pointe de lance est un cuivre à 2% d'arsenic et 2% d'étain. Il contient également du fer en impureté.

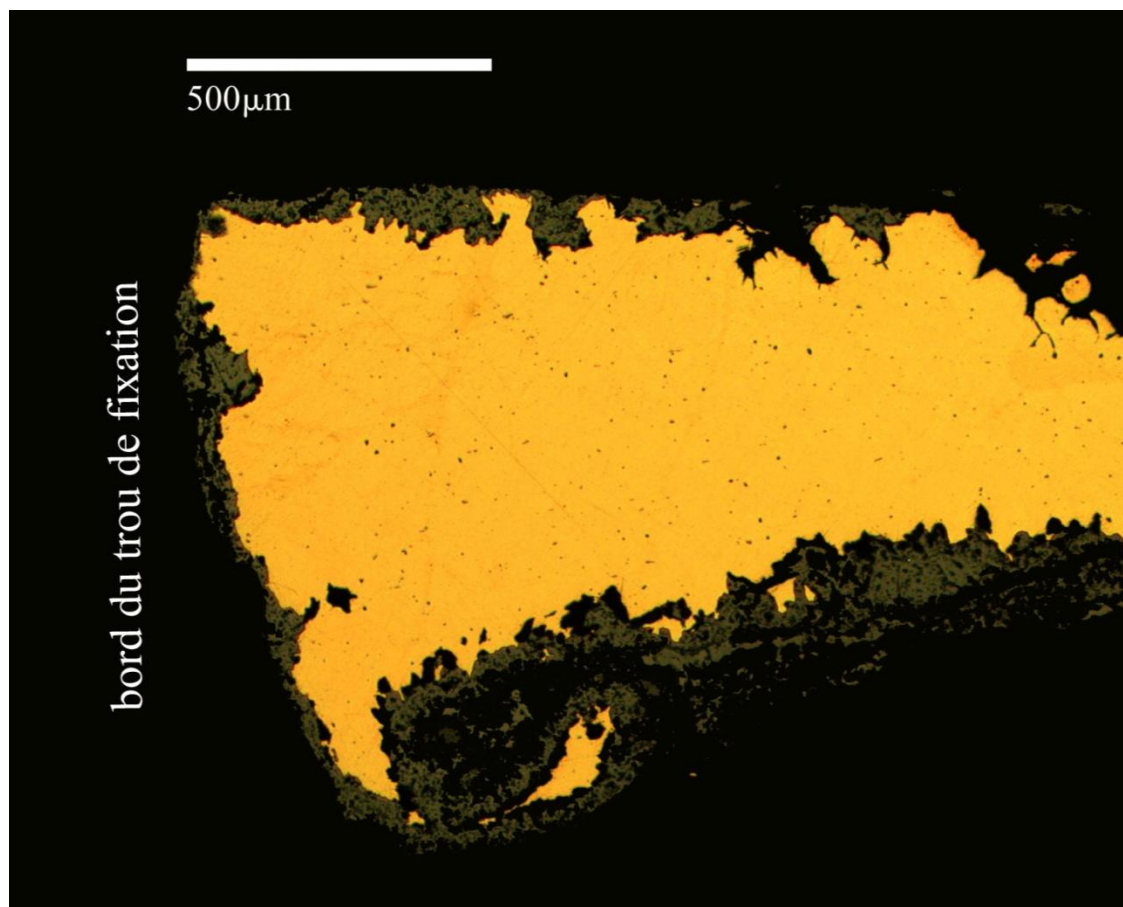


Figure 1 : coupe du bord du trou de fixation présentant l'effet du perçage où une partie de l'objet a augmenté d'épaisseur donnant à la section un aspect évasé (Microscope optique en réflexion).

¹ Ces mesures ne prennent pas en compte le bord du trou de fixation étant donné qu'il a subi une déformation différente de celle du reste de la douille au moment du perçage.

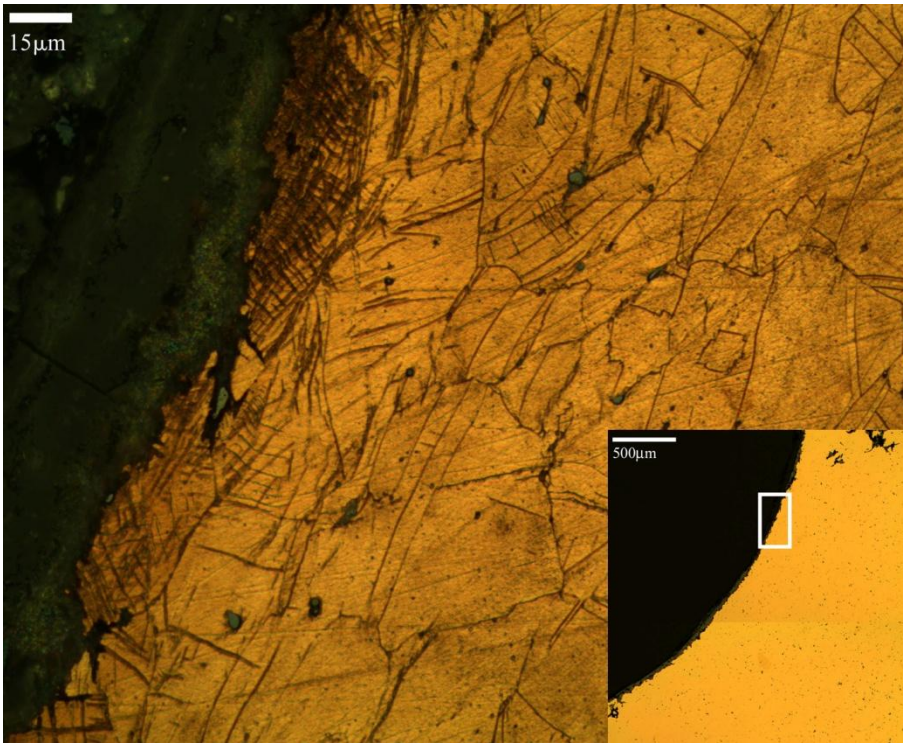


Figure 2 : surface de la douille présentant l'état écroui du bord du trou de fixation (partie encadrée en blanc) où les grains polygonaux allongés et maclés suivent la courbe du trou (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

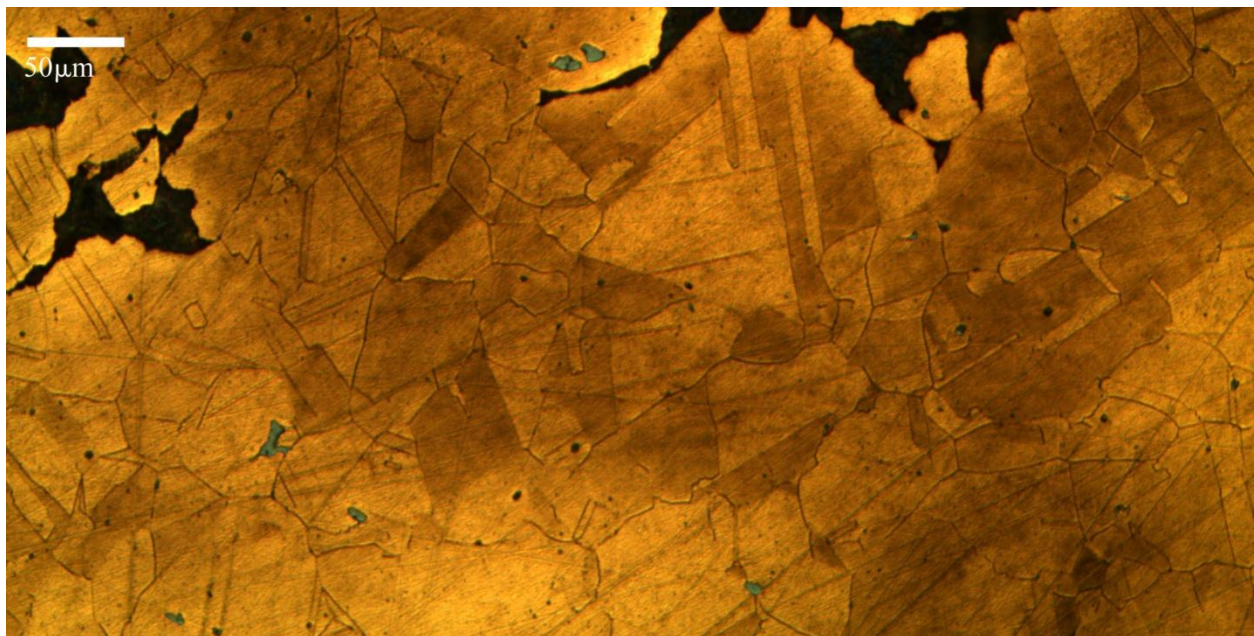


Figure 3 : surface de la « zone proximale » de la douille présentant un état recuit avec des grains polygonaux équiaxes (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Pointe de lance à douille moyenne 10978



Long. totale : 156 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 100 mm	Ep. joint zone centrale : 0.3 mm
Larg. de lame : 37 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 8 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 16 x 11 mm à 20 x 18 mm	Ep. Opp. joint zone centrale : 0.2 mm
Long. "partie fermée" : 3 mm	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 69 g	

Cette pointe de lance provient du dépôt khi du temple au champ des offrandes (Dunand, 1954 ; 392 ; pl. 78). La lame triangulaire est décorée par deux rainures de part et d'autre de la nervure centrale. L'arme est recouverte par une corrosion à dépôts foisonnant de couleur gris sombre, vert sombre et gris clair. Celle-ci est associée à des croûtes, des bubons, des patelles et des crevasses de couleur bleu clair. Il ne subsiste de la douille que la « zone distale » et la partie supérieure de la « zone centrale ». Deux échantillons ont été prélevés pour observer des coupes transversales et la surface de la douille dans la « zone centrale » supérieure. Des analyses d'isotopes du plomb ont été effectuées pour déterminer la provenance du cuivre utilisé dans l'alliage constituant cette arme.

L'échantillon prélevé au niveau de la « surface de joint » présente deux plaques de 300µm d'épaisseur chacune, attachées l'une au-dessus de l'autre par l'intermédiaire d'une brasure. Elles correspondent à la douille sur laquelle vient s'ajouter une autre plaque. Leur présence n'était pas visible à l'œil nu. Leurs structures cristallines sont identiques ; elles présentent des grains polygonaux équiaxes (Fig. 4). La brasure est concentrée du côté du joint sur une largeur de 2 mm (Fig. 4). Son épaisseur varie entre 60µm et 80µm. Elle présente des dendrites riches en cuivre entourées de phases eutectiques riches en argent (Fig. 8).

Les inclusions de sulfure de cuivre présentes sur les « surfaces de joint » de la « zone centrale » supérieure (Fig. 6 b) sont parallèles à l'axe. Elles ont une forme allongée et présentent un facteur de forme de 12. Elles ont été mesurées sur une surface rectangulaire de l'échantillon. Sa longueur est de 5800 μm et sa largeur de 725 μm . L'épaisseur est d'environ 300 μm (section transversale). Les inclusions de sulfure de cuivre parallèles sont présentes que sur une bande étroite sur la « surface de joint ». Sur une parcelle triangulaire adjacente à cette bande les inclusions de sulfure de cuivre (Fig. 6 a) sont perpendiculaires et obliques à l'axe. Elles présentent des formes ovales de facteur de forme ($f_{f\text{ moy.}}$) de 3. L'observation de cette même parcelle à partir de la coupe transversale montre que ces inclusions sont aplaties. En effet le facteur de forme de ces inclusions, calculé à partir de la coupe transversale ($f_{f\text{ moy.}} = 18$), a livré des valeurs plus importantes que celui calculé à partir de la surface. Ceci relève d'une déformation bi- ou multi- axiale (parallèle/oblique ou perpendiculaire). La surface de l'échantillon mesurée présente une hauteur de 1770 μm et une base de 2580 μm . L'épaisseur de cette partie varie entre 177 μm et 311 μm .

La plaque supérieure présente des inclusions de sulfure de cuivre aplaties de direction obliques à l'axe de la pointe de lance. Une fois encore, la forme de ces inclusions est due à la déformation biaxiale. Le facteur de forme ($f_{f\text{ moy.}}$) dans les deux sens est 4. Ces mesures ont été faites sur une surface triangulaire de 2400 μm de hauteur et de 1940 μm de base. L'épaisseur de cette partie varie entre 170 μm et 270 μm .

Un même alliage a été utilisé pour l'objet et l'ajout ; c'est un bronze à 8% d'étain contenant des impuretés de soufre et du fer. La soudure en alliage argent-cuivre contient 36%Cu et 4%Sn ainsi que des faibles quantités de magnésium et de soufre. Nous avons détecté une diffusion partielle de l'argent de la brasure dans les plaques en bronzes.

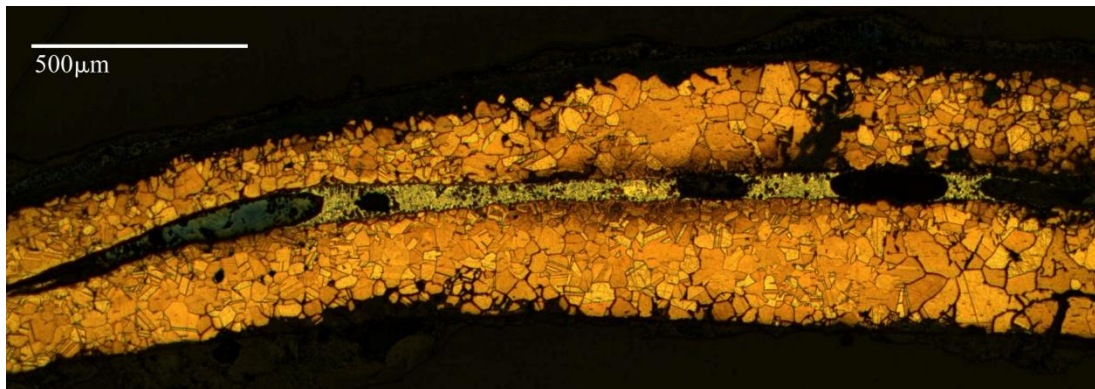


Figure 4 : coupe transversale de la « zone centrale » de la douille. La partie inférieure correspond à la douille et celle supérieure correspond à la plaque. La brasure est située au centre (gris bleuâtre). La douille et la plaque présentent une structure recristallisée (Microscope optique en réflexion, Attaque FeCl_3).

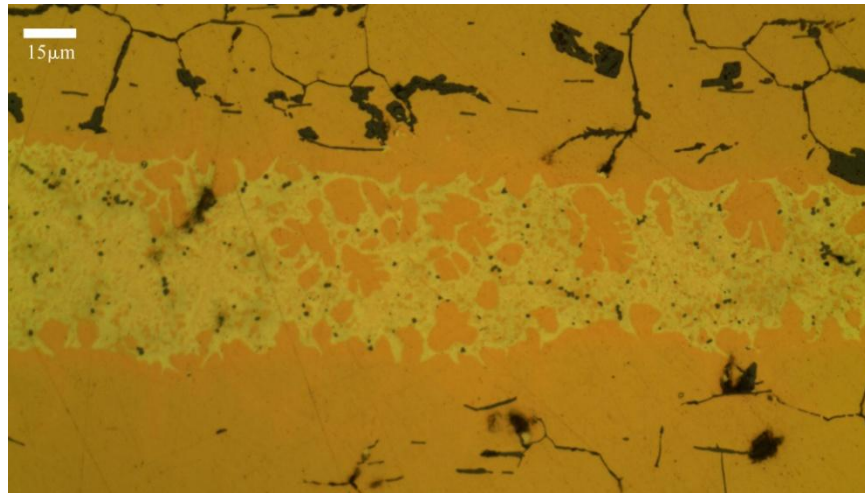


Figure 5 : détails de la soudure présentant des ségrégations (Microscope optique en réflexion)

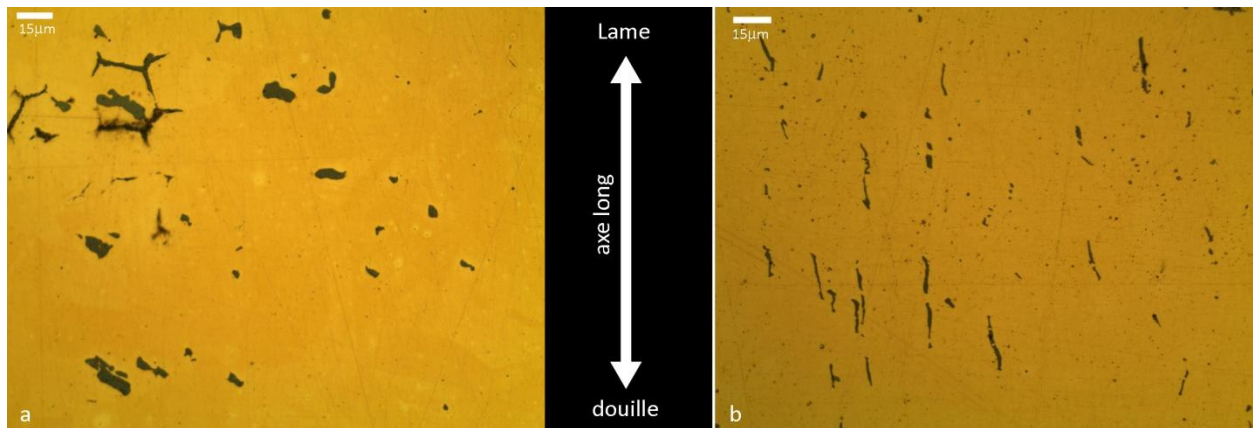


Figure 6 : a- inclusions de sulfure de cuivre aplaties observées sur la douille (« surface de joint » non incluse). Leurs axes sont obliques à l'axe long de l'arme ; b- inclusions de sulfure de cuivre allongées observées sur la « surface de joint ». L'allongement de ces inclusions est parallèle à l'axe de long de l'arme (Microscope optique en réflexion).

Pointe de lance 77137



Long. totale : 184 mm	Ep. joint zone distale : 0.6 mm
Long. de lame : 133 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 20 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 9 mm	Ep. Opp. joint zone distale: 0.4 mm
Dim. section douille : 16 x 11 mm à 16 x 14 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 2 mm	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 66 g	

Cette pointe de lance a été découverte dans le sondage 2 entrepris sur le site de Yanouh, dans une couche indéfinie (Monchambert *et al.*, 2010). Suite à plusieurs cassures, l'arme a perdu son tranchant, une partie de la « zone distale », de la « zone centrale » et « proximale ». Elle est recouverte d'une corrosion à dépôts foisonnants constituée de plages brun sombre et vert clair ainsi que de bubons, de croûtes, de crêtes et de fissures. La lame présente un recourbement qui est probablement associé à des conditions de déposition et de remaniement. Un échantillon a été prélevé pour étudier la surface et la coupe de la « zone distale » du côté opposé au joint.

L'échantillon présente des grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques, des inclusions de sulfure de cuivre allongées et des nodules de plomb arrondies. A peu près 50% des inclusions de sulfure de cuivre mesurées dans la « zone distale » sont allongées. Elles présentent un facteur de forme moyen de 2.5 et sont obliques et perpendiculaires à l'axe long de l'arme. Les 50% restant des inclusions de sulfure de cuivre sont arrondies. Ces mesures ont été réalisées sur une surface polygonale de 1100 μm de hauteur maximale et de 700 μm de largeur maximale. L'épaisseur de l'échantillon varie entre 270 μm et 430 μm (section transversale). L'alliage utilisé est un bronze à 9% d'étain.

Pointes de lances à douille courtes

Pointe de lance à douille courte 10274



Long. totale : 114 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 52 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 28 mm	Ep. joint zone proximale : 0.2 mm
Ep. Max. de la lame : 6 mm	Ep. Opp.* joint zone distale:
Dim. section douille : 13 mm x 8 mm (zone distale)	Ep. Opp.* joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp.* joint zone proximale : 0.7 mm
Poids : 37 g	

*Mesure de la partie de la douille située à l'opposé du joint de la douille

Cette pointe de lance provient du dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 187, 1950 ; pl. 58). La lame est pointue et sa ligne de tranchant est irrégulière. La douille présente un seul trou de fixation. Sa « zone centrale » est fissurée et les « surfaces de joint » de la « zone proximale » sont écartées. L'arme est recouverte d'une couche homogène de corrosion de texture fine et de couleur gris sombre. Nous avons détecté également sur l'ensemble de l'objet des piqûres, des patelles et des crevasses. La surface intérieure de la douille est recouverte d'une fine couche de couleur vert clair. Deux échantillons ont été prélevés pour observer les coupes et les surfaces de la partie inférieure de la « zone proximale ». Un troisième échantillon a été prélevé pour effectuer des analyses d'isotopes du plomb.

La douille présente une structure recristallisée avec des inclusions allongées riches en arsenic et antimoine. Dans les deux échantillons ces inclusions sont fragmentées. Au niveau de la « surface de joint » de la « zone proximale » elles sont parallèles par rapport à l'axe mais s'inclinent progressivement pour suivre la direction de la bordure de la douille (perpendiculaire à l'axe) (Fig.1). Le facteur de forme

($f_{f\ moy.}$) des inclusions parallèles et obliques est de 6, celui des inclusions perpendiculaires proches de la bordure est de 9. Ces mesures ont été réalisées sur une parcelle trapézoïdale de l'échantillon présentant une partie d'une « surface de joint » et une autre de la bordure. Sa longueur maximale est de 1770 μm et sa largeur maximale est de 1340 μm . L'épaisseur maximale est de 500 μm , elle est située au niveau du coin opposé à la bordure et au joint. Ces deux dernières parties sont complètement amincies (Fig. 3 et 4). Le facteur de forme ($f_{f\ moy.}$) calculé à partir des coupes transversale et longitudinale représentées dans le même échantillon est de 9. Ceci montre que ces inclusions ont une forme aplatie.

Les inclusions du côté opposé au joint sont de même direction que celles du côté du joint ; elles virent d'une direction parallèle par rapport à l'axe de l'objet à une direction qui suit la bordure. Le facteur de forme ($f_{f\ moy.}$) dans les trois directions est de 6. Ces mesures ont été faites sur une parcelle trapézoïdale de l'échantillon comprenant une partie de la bordure. Sa longueur maximale est de 2300 μm et sa largeur maximale est de 1800 μm . Son épaisseur maximale est de 750 μm et elle est complètement amincie au niveau de la bordure. Les facteurs de forme ($f_{f\ moy.}$) calculés à partir de la section transversale et longitudinale sont respectivement 17 et 15. Le métal utilisé pour la confection de cette arme est un cuivre à 4 Wt.% d'arsenic, il contient également 1 Wt.% d'antimoine.

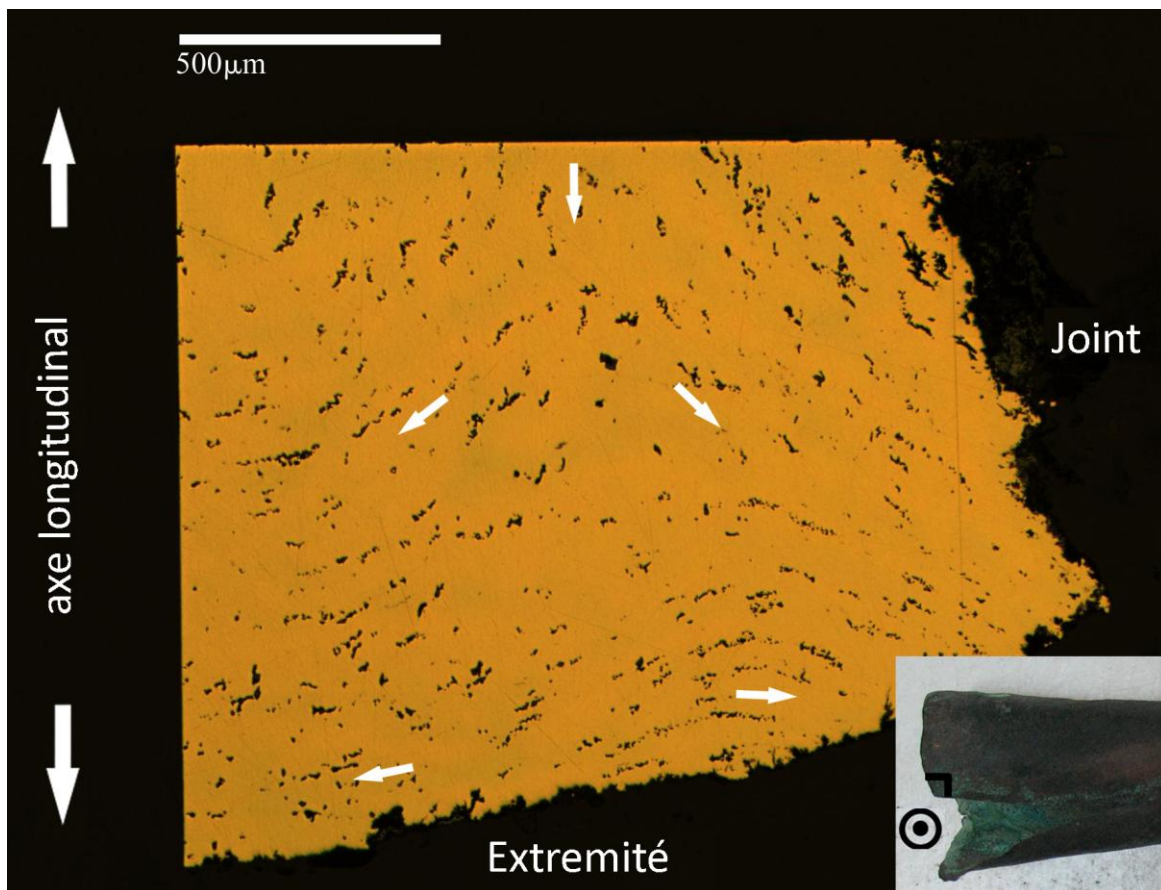


Figure 1 : échantillon présentant la surface de la zone distale inférieure du côté du joint. Notons le changement de direction des inclusions de parallèle à perpendiculaire à l'axe en s'approchant de la bordure. (Microscope optique en réflexion).

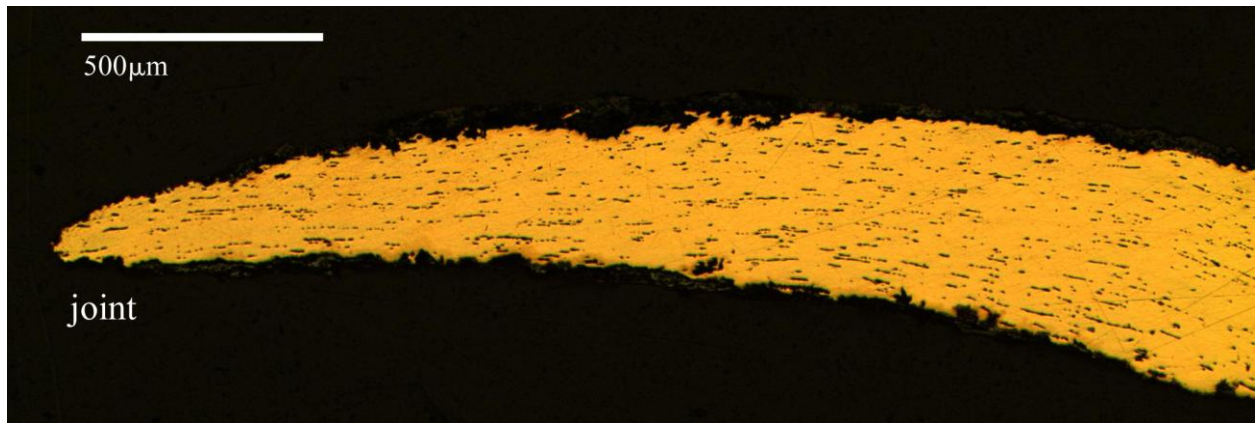


Figure 2 : coupe perpendiculaire à l'axe du même échantillon présentant la surface de joint de douille (Microscope optique en réflexion).

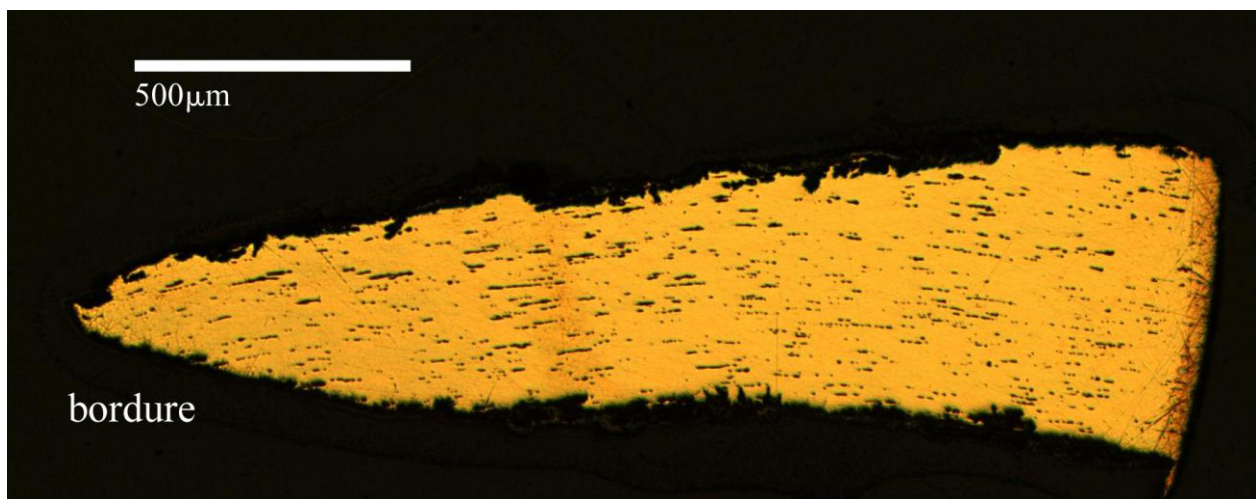


Figure 3 : coupe parallèle à l'axe du même échantillon présentant l'extrémité inférieure ou la bordure de la douille (Microscope optique en réflexion).

Pointe de lance à douille courte 10277



Long. totale : 185 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 90 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 24 mm	Ep. joint zone proximale : 0.4 mm
Ep. Max. de la lame : 6 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 13 mm x 11mm à 15 x 15 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 7mm	Ep. Opp. joint zone proximale : 1 mm (T.C.)
Poids : 64 g	

Cette pointe de lance provient du dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 187). La lame est asymétrique. La « zone proximale » de la douille comporte plusieurs cassures et un de ses côtés est replié vers l'extérieur. L'arme est recouverte d'une couche homogène de corrosion fine et de couleur gris sombre. Nous avons détecté sur une partie de la lame et de la zone centrale de la douille une corrosion à dépôt foisonnant constituée des croûtes de couleur verte, des croûtes terreuse et des crevasses.

Un échantillon a été prélevé pour étudier les coupes de la partie inférieure de la zone proximale. Il présente une structure recristallisée avec des inclusions allongées riche en arsenic. Un autre a servi pour effectuer des analyses d'isotopes du plomb

Le métal utilisé pour la fabrication de cet objet est un cuivre à 10 Wt.% d'arsenic. Notons que cette valeur prend en compte la matrice métallique et les inclusions qui peuvent contenir jusqu'à 70 Wt.% d'arsenic.

Pointe de lance à douille courte 10279



Long. totale : 133 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 43 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 20 mm	Ep. joint zone proximale : 0.2 mm
Ep. Max. de la lame : 5 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 14 mm x 8mm à 15 x 17 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp. joint zone proximale : 0.7 mm
Poids : 50 g	

Cette pointe de lance provient du dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 187, 1950 ; pl. 58). Le rapport de la longueur de la lame sur la longueur de la douille est de $\frac{1}{2}$, alors qu'il est proche de 1 pour les pointes de lance courtes de notre corpus. L'arme est recouverte de l'extérieure d'une couche homogène de corrosion fine de couleur gris sombre ainsi que de quelques piqûres. La surface intérieure de la douille est recouverte d'une couche homogène fine de couleur vert clair. Une partie de la « zone proximale » manque. La lame, de section ovale, présente des irrégularités sur la ligne du tranchant. Deux échantillons ont été prélevés pour observer les coupes et les surfaces de la « zone proximale ». Cette pointe de lance a fait l'objet d'une étude de provenance par analyses d'isotopes du plomb.

La douille présente une structure recristallisée avec des inclusions de sulfure de cuivre fragmentées et allongées. Le métal utilisé pour la fabrication de cette arme est un cuivre à 4 Wt.% d'arsenic. Les sulfures de cuivre sont riches en fer.

Pointe de lance 10280



Long. totale : 158 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 76 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 25 mm	Ep. joint zone proximale : 0.4 mm
Ep. Max. de la lame : 6 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 13 mm x 9 mm à 13 mmx 13 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp. joint zone proximale : 0.6 mm
Poids : 60 g	

Cette pointe de lance appartient au dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 187, 1950 ; pl. 58). La lame présente des irrégularités sur la ligne du tranchant. L'arme est recouverte d'une couche homogène de corrosion fine de couleur gris sombre et quelques piqûres et patelles sont présentes. La douille est cassée au niveau de la « zone proximale ». Deux échantillons ont été prélevés pour observer les coupes et les surfaces du milieu de la « zone proximale ». Un autre échantillon a été prélevé pour effectuer des analyses d'isotopes de plomb.

La douille présente une structure recristallisée avec des inclusions de sulfure de cuivre allongées (Fig. 4). Parmi ces inclusions, certaines sont fragmentées. Sur le prélèvement correspondant à la « surface de joint » de la « zone proximale », nous avons mesuré les inclusions de sulfure de cuivre sur une parcelle quasi-rectangulaire. Sa longueur maximale est de 1700 μm et sa largeur maximale de 1200 μm . L'épaisseur varie entre 441 μm et 300 μm . L'allongement des inclusions de sulfure de cuivre mesurées est parallèle par rapport à l'axe et présent un facteur de forme ($f_{f \text{ moy.}}$) de 11. Les facteurs de forme mesurés ($f_{f \text{ moy.}}$) à partir de la section transversale et longitudinale sont de 12. Ceci nous permet de postuler que la forme des inclusions de sulfure de cuivre est cylindrique ou en forme de « cigare ».

Sur le prélèvement correspondant à la « zone proximale » du côté opposé au joint, nous avons mesuré les inclusions de sulfure de cuivre sur une surface trapézoïdale. Sa longueur maximale est de 2500 μm et sa largeur maximale de 1600 μm . L'épaisseur varie entre 570 μm et 590 μm . Les inclusions des sulfure de cuivre mesurées sont parallèles ou obliques par rapport à l'axe, dont les facteurs de forme ($f_{f\text{ moy.}}$) sont respectivement de 6 et 8. Cependant, nous constatons un écart significatif entre ces valeurs et celles des facteurs de forme calculés à partir de la section transversale ($f_{f\text{ moy.}} = 12$) et longitudinale ($f_{f\text{ moy.}} = 13$)

Le métal utilisé est un cuivre à 3 Wt.% d'arsenic. Il contient également 1 Wt.% d'antimoine, du fer et du soufre. Les sulfures de cuivres sont riches en fer (7 Wt.%) et contiennent du sélénium (2 Wt.%).

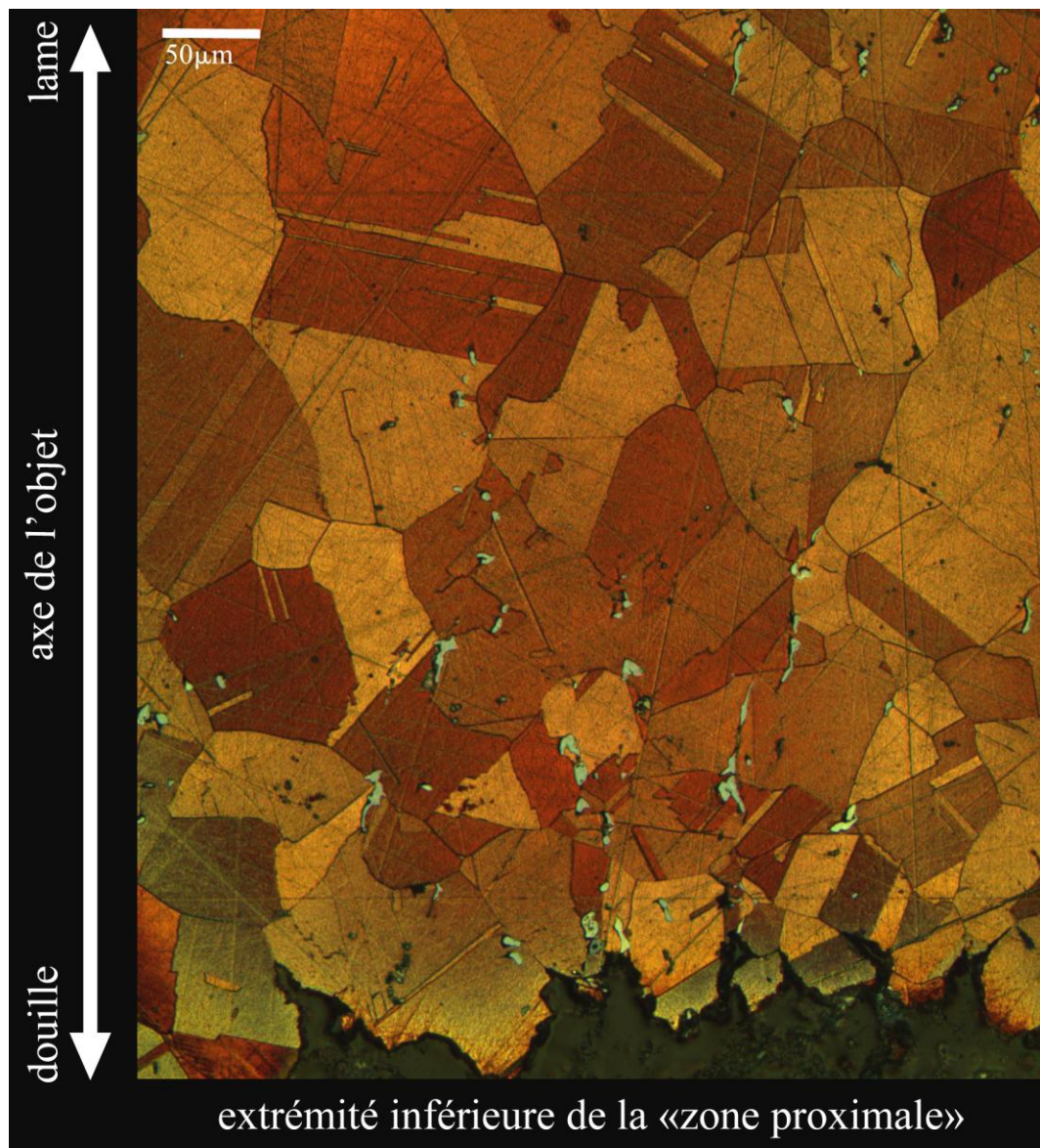


Figure 4 : surface de la zone distale du côté des joints présentant une structure recristallisée et des inclusions de sulfure de cuivre allongées (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Pointe de lance à douille courte 10301



Long. totale : 198 mm	Ep. joint zone distale : 0.3
Long. de lame : 111 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 25 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 4 mm	Ep. Opp. joint zone distale: 0.1
Dim. section douille : 12 mm x 9mm (distale)	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp. joint zone proximale : 0.5 mm
Poids : 49 g	

Cette pointe de lance provient du dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 187, 1950 ; pl. 58). Nous remarquons que la ligne du tranchant présente plusieurs irrégularités. La douille est formée par le repliement de ses deux bords vers l'intérieur donnant ainsi une forme à peu près conique. Elle comporte, deux trous de fixation dans la « zone proximale ». Ceux-ci servent à maintenir la pointe de lance sur une hampe. Suite à des cassures et/ou à un travail de restauration plusieurs parties manquent. L'arme est recouverte d'une couche homogène de texture fine de couleur gris sombre. Elle présente également une corrosion locale constituée de patelles et de piqûres. Deux échantillons ont été prélevés pour observer la « zone proximale » et la « zone distale » de la douille. Des analyses d'isotopes de plomb ont été effectuées sur cette arme.

Le métal utilisé pour la fabrication de cette pointe de lance est un cuivre à l'arsenic (3 Wt.%). Nous avons détecté des inclusions de sulfure de cuivre et des inclusions riches en arsenic et en antimoine. Egalement, nous avons détecté au niveau de la surface de l'objet des nodules de cuivres qui sont parfois associés à des nodules riches en d'argent (83 Wt.%). Ces deux derniers types d'inclusions semblent être liés à un mécanisme de corrosion. La douille présente une structure recristallisée avec des grains polygonaux équiaxes et des macles thermiques (Fig. 5).

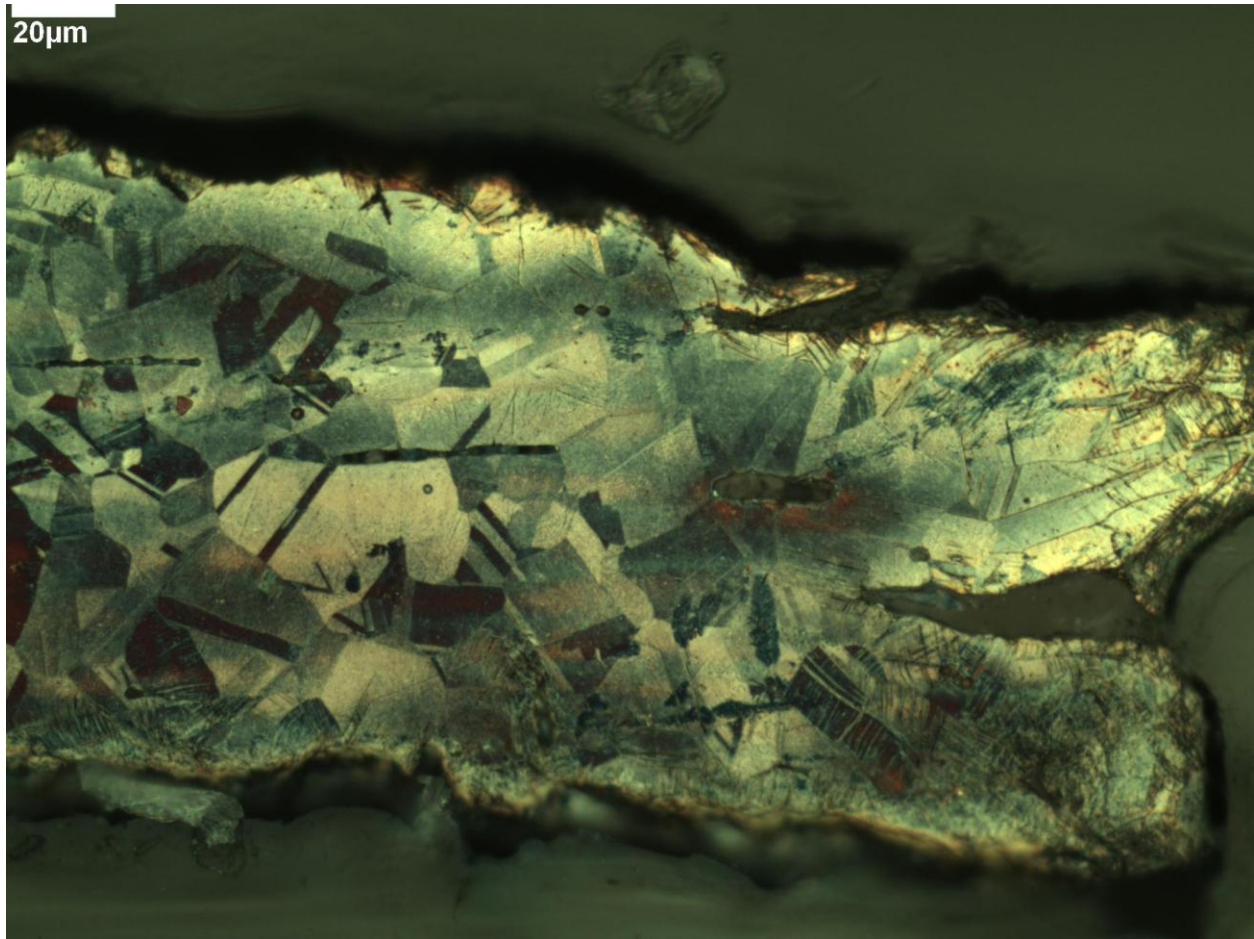


Figure 5 : structure recristallisée observée sur la coupe longitudinale de l'extrémité inférieure de la « zone proximale » de la douille. Elle présente des grains polygonaux équiaxes et des macles thermiques (Microscope optique en réflexion, attaque au FeCl_3 .)

Pointe de lance à douille courte 10303



Long. totale : 124 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 72 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 23 mm	Ep. joint zone proximale : 0.3 mm
Ep. Max. de la lame : 2 mm	Ep. Opp. joint zone distale :
Dim. section douille : 14 mm x 9mm à 17 mm x 17 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp. joint zone proximale : 1.2 mm
Poids : 24 g	

Cette pointe de lance a été découverte dans le dépôt β du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 187, 1950 ; pl. 58). La ligne du tranchant présente plusieurs irrégularités. La douille présente plusieurs cassures au niveau de la « zone distale », de l'extrémité inférieure de la « zone proximale » et sur un trou de rivet.

L'arme est recouverte d'une couche homogène de texture fine de couleur gris sombre. Elle présente également une corrosion locale constituée de crevasses, de patelles et de piqûres rendues visible suite à une restauration. Nous avons détecté un grand nombre de stries larges sur l'ensemble de l'arme. Celles-ci ne suivent pas une direction précise (Fig. 6). La restauration pourrait être à l'origine de la formation de ces stries et de la perte d'une partie de la lame, lui donnant ainsi un aspect concave dentelé. D'ailleurs, il est fort probable que les pointes de lance du dépôt β comme 10274, 10279, 10280 et 10301 aient subi également une restauration moderne par des bains d'acide et un décapage mécanique des couches de corrosion. Deux échantillons ont été prélevés pour examiner la coupe et la surface de la « zone proximale » de la douille ainsi que la surface de la lame au niveau du tranchant. Nous avons effectué des analyses d'isotopes du plomb pour déterminer la provenance du cuivre utilisé dans cette arme.

Le métal utilisé dans la fabrication de cette pointe de lance est un cuivre à l'arsenic. Il contient une quantité non négligeable d'inclusions riches en arsenic et en antimoine (Fig. 7) et quelques inclusions de sulfure de cuivre. La matrice est composée de 97 Wt.% de cuivre, 2 Wt.% d'arsenic et moins d'1 Wt.% d'antimoine. Par contre la composition globale du métal, c.à.d. matrice et inclusions, compte de 95 Wt.% de cuivre, 3 Wt.% d'arsenic et 2 Wt.% d'antimoine.

Notons que la composition de la matrice du métal utilisé dans la pointe de lance 10303(8279) et celle de l'alliage de la pointe de lance 10301(8289) sont à peu près semblables. Il est très probable que les deux

pointes de lance aient des compositions proches; cependant nous n'avons pas pu réaliser des analyses exploitables sur la pointe de lance 10301(8289) à cause de la perte de la majorité des inclusions riches en antimoine et en arsenic lors de la préparation de l'échantillon. Celui-ci nous aurait alors livré des résultats biaisés sur la teneur en arsenic et en antimoine.

L'extrémité inférieure de la « zone proximale » de la douille présente une structure recristallisée avec des grains équiaxes (Fig. 7). L'état corrodé de la surface de l'échantillon a rendu impossible la détermination de la direction et du facteur de forme des inclusions. La surface de la lame présente une structure recristallisée avec des grains équi-axes et des inclusions allongées. Celles-ci ont une direction perpendiculaire à l'axe de l'objet. Notons que les inclusions riches As et Sb sont fracturées.



Figure 6 : partie de la lame présentant des traces variées. Les stries recouvrent l'ensemble de l'objet, à gauche se trouvent des crevasses, en bas à droite on voit la partie concave dentelée de la flamme.

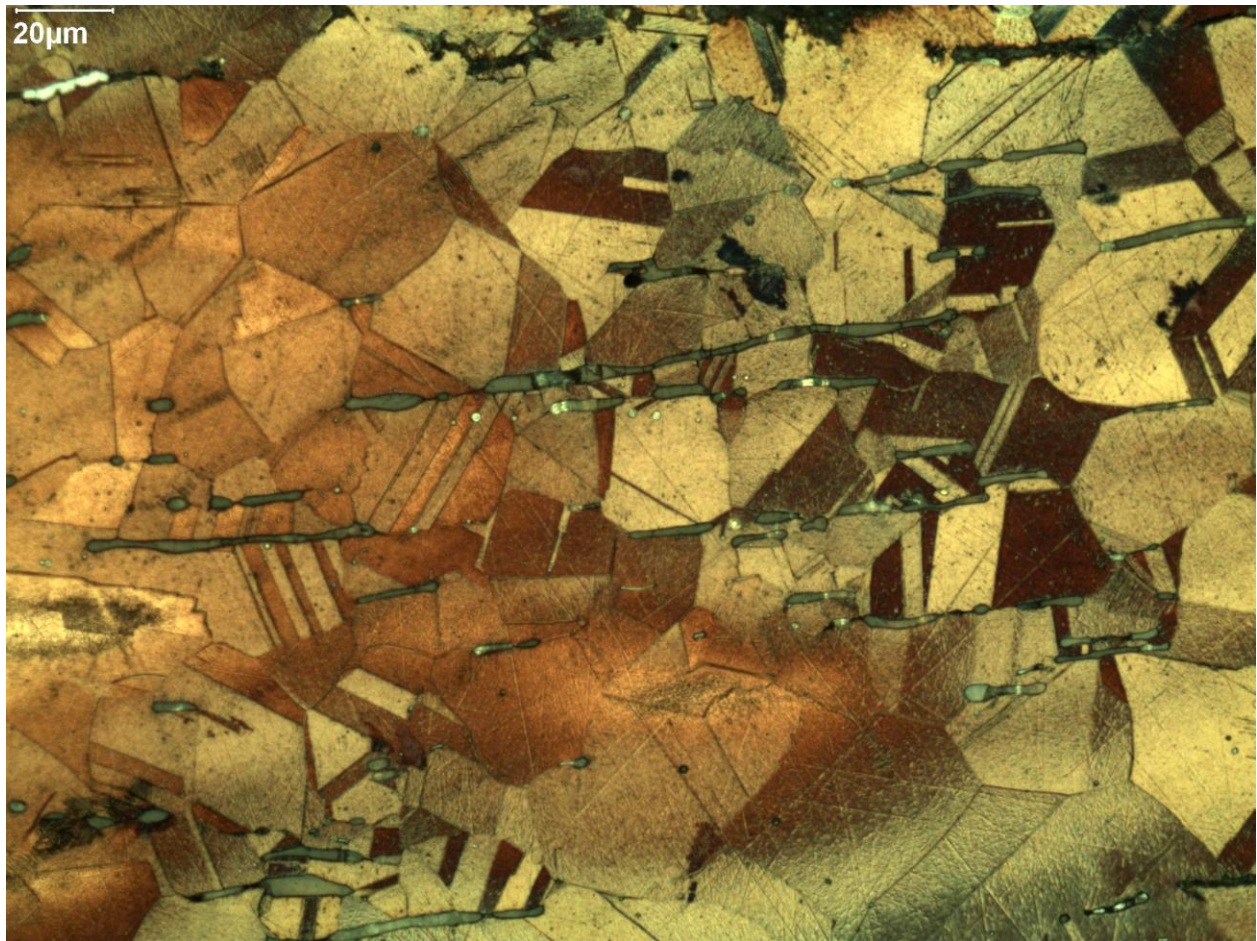


Figure 7 : coupe longitudinale de l'extrémité inférieure de la « zone proximale » de la douille. Elle présente une structure recristallisée avec des grains équiaxes et des inclusions allongées (en bleu) (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Pointe de lance à douille courte 10322



Long. totale : 155 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 78 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 26 mm	Ep. joint zone proximale : 1.3 mm
Ep. Max. de la lame : 6 mm	Ep. Opp. joint zone distale :
Dim. section douille : 14 mm x 18mm à 18 mm x 20 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 13 mm	Ep. Opp. joint zone proximale : 1.2 mm
Poids : 80 g	

Cette pointe de lance provient du dépôt γ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 191). La douille présente dans sa « zone proximale » un trou de fixation situé du côté opposé du joint. L'arme est recouverte de corrosions à dépôt foisonnant de couleur gris sombre et vert sombre associée à des croûtes de couleur vert sombre, des croûtes terreuses et des fissures. Un échantillon a été prélevé du tranchant pour observer sa coupe transversale.

L'échantillon présente des grains polygonaux allongés associés à des macles mécaniques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. Cette partie de l'arme a donc subi une ou plusieurs passes de déformation/recuit conclus par une déformation.

Le métal employé pour la fabrication de cette pointe de lance est un cuivre à 4.5 Wt.% d'arsenic. Il contient également 0.5 Wt.% de fer.

Pointe de lance à douille courte 10325



Long. totale : 164 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 87 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 24 mm	Ep. joint zone proximale : 0.5 mm
Ep. Max. de la lame : 7 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 13 mm x 9 mm à 13 mm x 18 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 28 mm	Ep. Opp. joint zone proximale : 1 mm
Poids : 52 g	

Cette pointe de lance provient du dépôt γ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 191). La douille présente dans sa « zone proximale » un trou de fixation situé du côté opposé au joint de douille. Une partie du tranchant de la lame est cassée et la « zone proximale » de la douille a été pliée vers l'extérieur. L'arme est recouverte par une corrosion rugueuse à dépôts foisonnants de couleur vert sombre et clair ainsi que des croûtes terreuses. La cassure du tranchant a révélé que la lame est atteinte d'une corrosion de type lamellaire. Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe transversale d'une partie située entre le joint et leur côté opposé de la « zone proximale ». Cette partie présente une structure recristallisée avec des inclusions de sulfure de cuivre allongées et des nodules de plomb. L'alliage utilisé pour la fabrication de cette arme est un bronze à 13 Wt.% d'étain avec environ 1 Wt.% de plomb.

Pointe de lance à douille courte 10810



Long. totale : 132 mm	Ep. joint zone distale : 0.3 mm
Long. de lame : 92 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 25 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 6 mm	Ep. Opp. joint zone distale: 0.2 mm
Dim. section douille : 12 mm x 14 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 5 mm	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 34 g	

D'après Dunand (1939 ; 283, 1937 ; pl. 95) cette pointe de lance a été retrouvée au cours de la démolition des murs des levées XI à XX sans d'autres précisions. La lame présente une nervure centrale décorée de part et d'autre de deux rainures. La pointe de la lame semble être émoussée et le tranchant est irrégulier. La pointe de lance a perdu la majorité de la douille ainsi qu'une partie de la lame. Cette dernière présente des rayures de polissage de même sens que son axe (Fig. 8). L'aspect émoussé de la pointe, les rayures longitudinales sur la lame et la perte de plusieurs parties de la douille et du tranchant peuvent tous être la conséquence d'une restauration moderne aux bains d'acide et par l'application d'un décapage mécanique pour éliminer la corrosion. L'arme est recouverte d'une couche homogène de corrosion de texture fine et de couleur gris sombre. Elle présente une corrosion locale de piqûres, de patelles et de plages fines de couleur gris clair et vert. Trois échantillons ont été prélevés pour l'étude des surfaces et des coupes de la « zone distale » et « centrale » de la douille ainsi que la coupe de la lame.

Le métal utilisé pour la fabrication de cet objet est un cuivre à l'arsenic avec 96 Wt.% de cuivre et 2,5 Wt.% d'arsenic, le reste (1.5 Wt.%) est partagé entre des impuretés d'étain et de fer. L'examen de la coupe de la lame a révélé une structure dans un état écroui avec des grains polygonaux présentant des macles mécaniques. Ces grains ont un facteur de forme de l'ordre 5. Ceci représente l'effet de la dernière déformation de la lame.

La douille présente une structure recristallisée avec des grains équiaxes et des inclusions de sulfures de cuivre allongés et fracturés. L'étude de la section de la douille montre que les « surfaces du joint » de douille sont plus épaisses que le reste de la douille et ont subi un lissage sur leur face interne manifesté par des macles mécaniques sur la surface (Fig. 9).

La « zone distale » du côté des « surfaces du joint » présente des inclusions parallèles et obliques à l'axe de l'objet avec un facteur de forme ($f_{f\ moy.}$) de l'ordre de 12. Notons que les sulfures de cuivre obliques par rapport à l'axe représentent 40 Wt.% des inclusions mesurées et que leur nombre augmente en s'éloignant de la « surface de joint ». Ces mesures ont été faites sur une surface trapézoïdale de longueur maximale de 1280 μm et de largeur maximale 1160 μm . L'épaisseur de l'échantillon varie entre 180 μm et 280 μm . Dans la « zone centrale » les inclusions de sulfure de cuivre suivent l'axe de la douille (Fig. 10) avec un facteur de forme ($f_{f\ moy.}$) de 14. Ces mesures ont été faites sur une surface trapézoïdale de longueur maximale de 2740 μm et de largeur maximale 2130 μm . L'épaisseur de l'échantillon varie autour de 260 μm .



Figure 8 : observation de plusieurs stries ou rayures sur la lame.

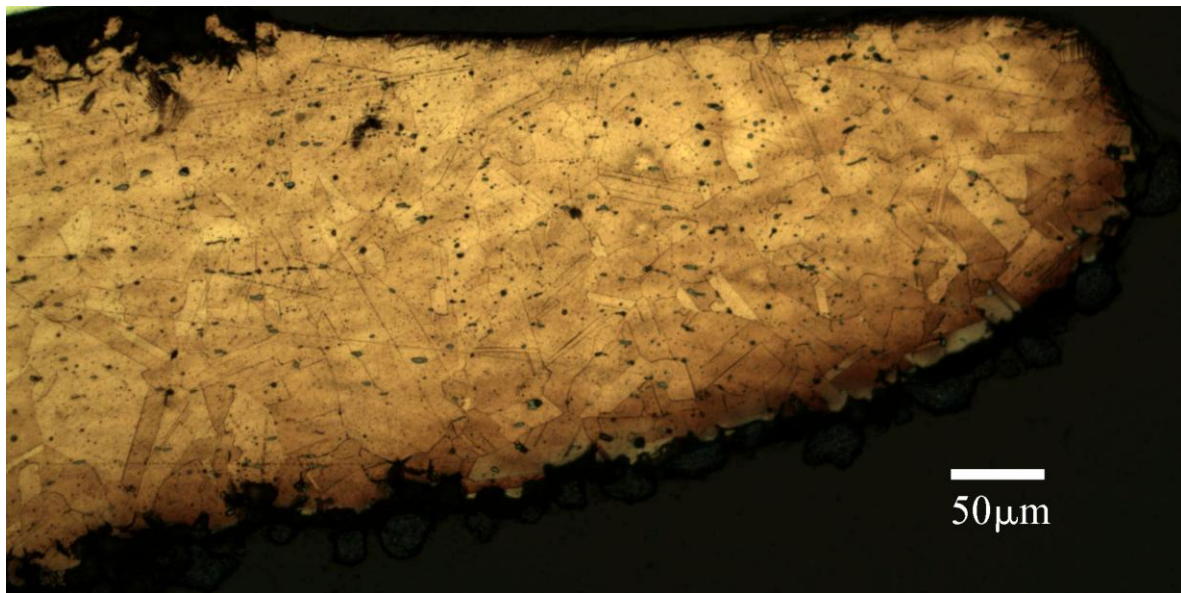


Figure 9 : coupe transversale de la « zone distale » montrant la « surface joint ». Elle présente une structure recristallisée. La surface interne de la « surface de joint » (en haut de l'image) est lissée (microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

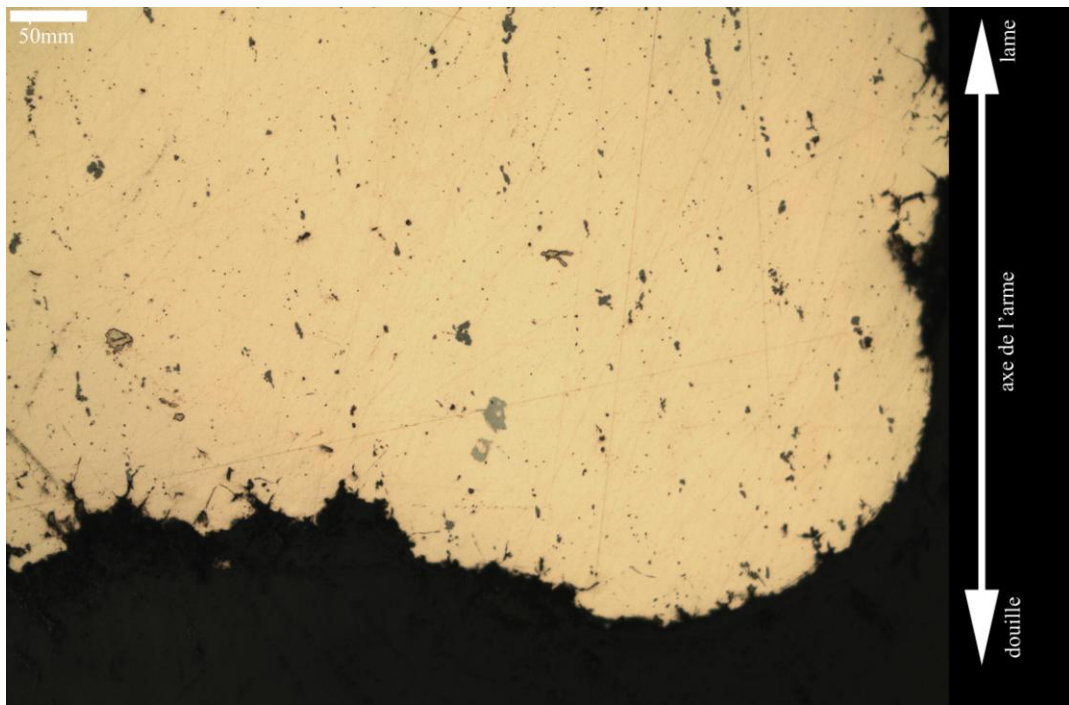


Figure 10 : Surface de la « zone centrale » au niveau de la « surface de joint ». Notons la direction parallèle à l'axe de l'objet des inclusions de sulfure de cuivre allongées et fragmentaires (microscope optique en réflexion).

Pointe de lance à douille courte 10976



Long. totale : 160 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 114 mm	Ep. joint zone centrale : 0.3 mm
Larg. de lame : 34 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 9 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 19 mm x 9 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 66 g	

Cette pointe de lance provient du dépôt χ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 392, 1950 ; pl. 78). La lame est décorée par deux rainures de part et d'autre de la nervure centrale. La douille est constituée d'une partie originelle appartenant à l'arme entourée de deux plaques ajoutées. Les joints de ces deux plaques ne sont pas superposés à celui de la douille. L'arme est recouverte par une corrosion à dépôts foisonnant de couleur gris sombre, vert sombre, brun clair et gris clair associés à des bubons, des patelles, des crêtes et des crevasses. Un échantillon a été prélevé pour étudier la coupe transversale de la douille et des plaques au niveau de l'extrémité de la douille originelle. Un autre a été prélevé du côté opposé au joint pour effectuer des analyses d'isotopes du plomb.

Etant donné que la partie de l'échantillon correspondant à la plaque supérieure s'est effritée durant le processus de prélèvement, nous avons eu la possibilité d'étudier uniquement la structure de la douille et la plaque inférieure.

Les douilles originelles et ajoutées présentent des grains polygonaux, des macles thermiques et inclusions de sulfure de cuivre allongées. Les deux douilles sont maintenues ensemble par une brasure d'une épaisseur qui varie entre 110 μm et 130 μm . La majeure partie (Fig. 11) de cette brasure est concentrée sur approximativement 2mm de chaque côté du joint. Cependant nous avons observé une goutte isolée de brasure (Fig. 13) à 3.5 mm du joint. La brasure présente des dendrites riches en cuivre entourées d'une structure des phases eutectiques riches en argent (Fig. 12).

L'alliage utilisé pour la fabrication de l'arme est un bronze à 7 Wt.% d'étain. Celui utilisé pour la fabrication de la douille ajoutée inférieure est un bronze à 8 Wt.%. Les deux alliages contiennent de faibles quantités de fer et de soufre. L'alliage argent-cuivre utilisé pour la fabrication de la brasure

contient 38 Wt.% de cuivre. L'argent (1 Wt.%) a été détecté au centre de la coupe de la douille ajoutée inférieure ce qui montre que la brasure s'est bien diffusée dans cette partie de l'objet.

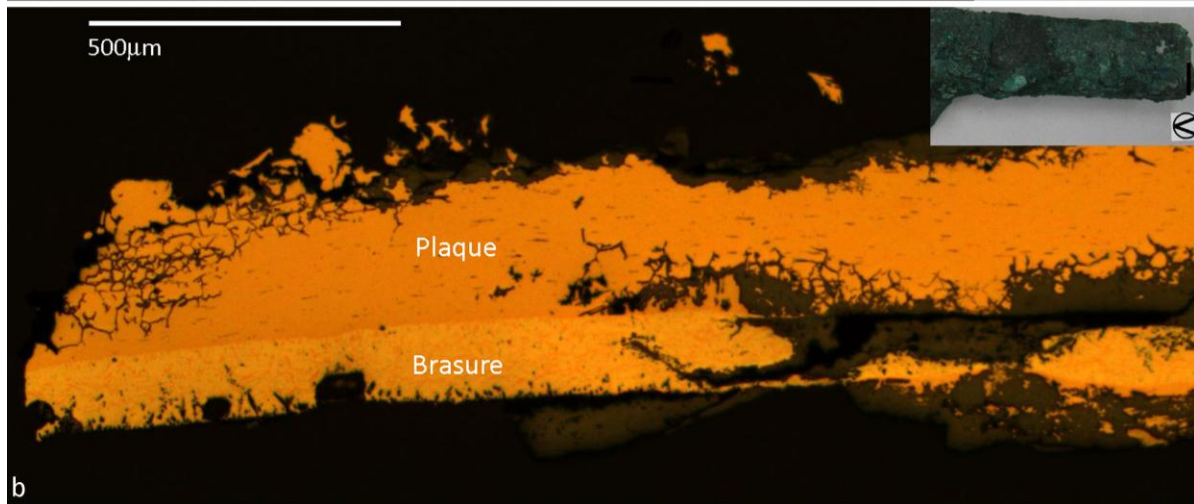


Figure 11 : coupe présentant la plaque inférieure (en haut) et la brasure (en bas). Une partie de la douille (en bas à droite de la coupe) subsiste au dessous de la brasure (Microscope optique en réflexion).

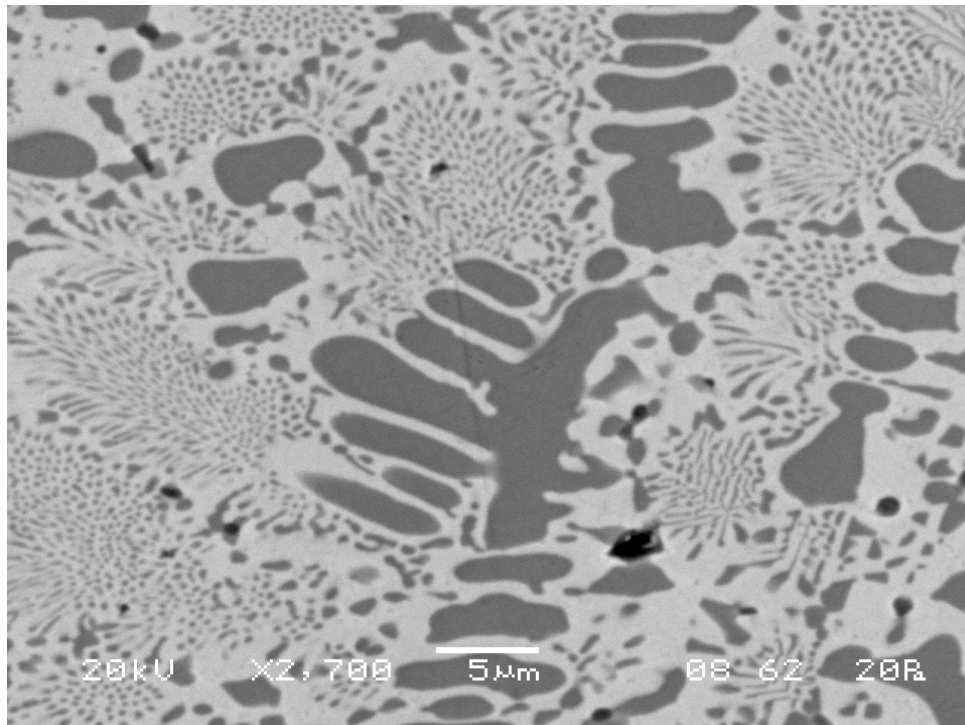


Figure 12 : détail de la microstructure de la brasure. Les dendrites (en gris sombre) sont riches en cuivre. Elles sont entourées d'une structure en multi-phase (en gris clair) riche en argent (Imagerie MEB, mode Shadow).

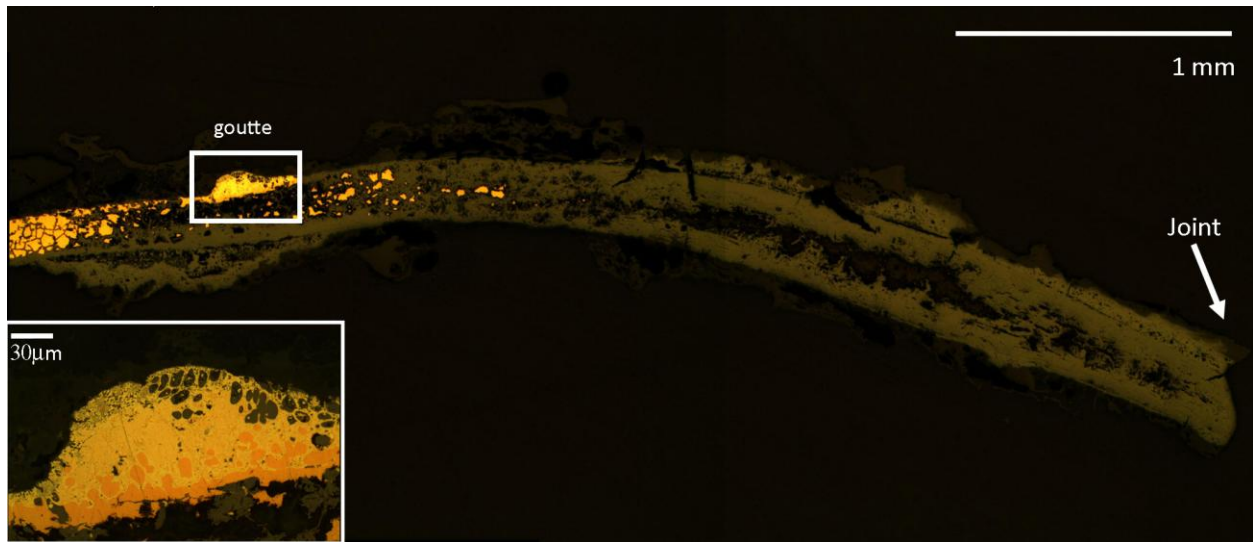


Figure 13 : localisation d'une goutte (encadrée en blanc) par rapport au joint de la douille (Microscope optique en réflexion).

Pointe de lance à douille courte 10977



Long. totale : 188 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 117 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 34 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 10 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 12 mm x 17 mm à 14 mm x 14 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp. joint zone proximale : 0.2 mm
Poids : 65 g	

Cette pointe de lance provient du dépôt χ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 392, 1950 ; pl. 78). La lame triangulaire est décorée par deux rainures de part et d'autre de la nervure centrale. Comme dans l'arme précédente la douille est entourée d'une plaque en alliage cuivreux. Cependant les joints de ces deux pièces sont superposés. La plaque a subi plusieurs cassures. Cependant sa partie restante augmente la longueur de l'arme de 8mm. La nervure de la lame présente en son milieu une fissure latérale par rapport à l'axe de l'objet. L'arme est recouverte par une corrosion à dépôts foisonnant de couleur gris sombre, vert sombre, brun clair et gris clair. Ils sont associés des bubons, des patelles et des crevasses. Deux échantillons ont été prélevés pour étudier la coupe transversale de la partie supérieure de la plaque (Fig. 14 A) ainsi que la surface, la coupe transversale et longitudinale de la « zone proximale » de la douille originelle (Fig. 14 B). Une partie de ce dernier échantillon a été utilisée pour effectuer des analyses d'isotopes du plomb.

Les deux échantillons présentent des grains polygonaux équiaxes, des macles thermiques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. La partie supérieure de la plaque (370 μm à 220 μm d'épaisseur) est surmontée d'une couche de corrosion fine (Fig. 14) assez régulière séparée en deux (40 μm à 50 μm d'épaisseur pour l'une et 80 μm à 90 μm d'épaisseur pour l'autre) par un tas de forme trapézoïdale. La couche fine de corrosion et le tas sont composés essentiellement de cuivre. Ils contiennent de faibles quantités d'étain (1 Wt.%).

Les inclusions de sulfure de cuivre, présentes sur une surface opposée au joint de la « zone proximale » inférieure de la douille, sont obliques (70 %) et parallèles (30 %) à l'axe. Le facteur de forme des inclusions obliques est de 12 et celui des inclusions parallèles est de 11. Ces mesures ont été prises à

partir d'une surface pentagonale de l'échantillon. La longueur de son plus grand côté est de 2780 μm et sa longueur maximale est de 1880 μm . L'épaisseur varie entre 130 μm et 200 μm (section transversale).

L'alliage utilisé pour la fabrication de la douille ajoutée est un bronze à 8 Wt.% d'étain. Celui utilisé pour la fabrication de l'arme est un bronze à 7 Wt.%. Les deux alliages cuivreux contiennent également de faibles quantités de soufre.



Figure 14 : Photo A : localisation de l'échantillon prélevé de la partie supérieure de la plaque ajoutée. Photo B : emplacement de l'échantillon prélevé de la partie distale de la douille du côté opposé au joint.

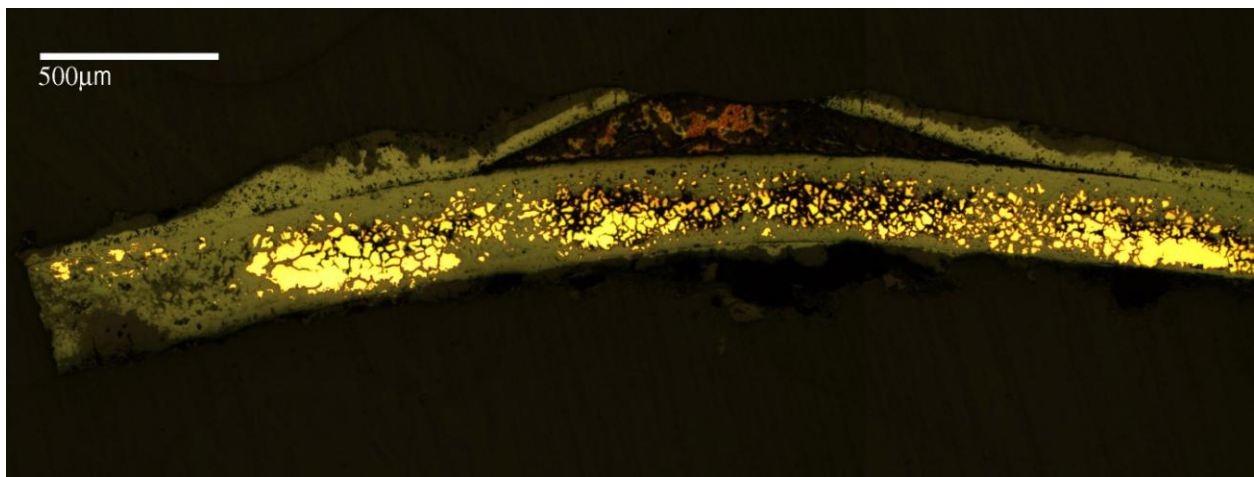


Figure 15 : coupe de la plaque présentant une couche de corrosion fine et régulière. Cette couche de corrosion est séparée en deux par un tas de corrosion composé de cuivre (Microscope optique en réflexion).

Pointe de lance à douille courte 10982



Long. totale : 184 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 119 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 31 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 9 mm	Ep. Opp. joint zone distale :
Dim. section douille : 11 mm x 12 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" :	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 49 g	

Cette pointe de lance provient du dépôt χ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 392, 1950 ; pl. 78). La lame triangulaire est décorée par deux rainures de part et d'autre de la nervure centrale. La douille est entourée d'une plaque en alliage cuivreux. Le joint de la douille et celui de la plaque ne sont pas superposés. Elle présente une déchirure au niveau de sa « zone distale ». Suite à une ou plusieurs cassures, la plaque est aujourd'hui incomplète. Cependant, sa partie restante augmente la longueur de l'arme de 16mm. L'arme est recouverte par une corrosion à dépôts foisonnant de couleur gris sombre, vert sombre et gris clair associées à des croûtes, des bubons, des patelles et des traces de bois. Un échantillon a été prélevé pour étudier les coupes de douilles et de la plaque. Une partie de cet échantillon a servi pour effectuer des analyses d'isotopes du plomb

L'épaisseur de la douille varie entre 180 μm et 200 μm tandis que celle de la plaque varie entre 110 μm et 130 μm . L'état corrodé de l'échantillon a empêché l'étude de sa structure cristalline. L'analyse élémentaire de l'échantillon montre que la plaque contient principalement du cuivre et de l'étain (entre 15 Wt.% et 20 Wt.%) ainsi qu'une faible quantité de soufre. La douille contient essentiellement du cuivre et de faibles quantités d'étain (0.7 Wt.%) et du soufre.

Pointe de lance à douille courte 10997



Long. totale : 173 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 114 mm	Ep. joint zone centrale : 0.4 mm
Larg. de lame : 42 mm	Ep. joint zone proximale :
Ep. Max. de la lame : 9 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 11 mm x 16 mm à 13mm x 15 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 12 mm	Ep. Opp. joint zone proximale :
Poids : 91 g	

Cette pointe de lance appartient au dépôt χ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 392, 1950 ; pl. 78). La lame triangulaire est décorée par deux rainures de part et d'autre de la nervure centrale. La douille est entourée par au moins deux plaques ajoutée. Suite à une ou plusieurs cassures, les douilles sont aujourd'hui incomplètes. L'arme est recouverte par une corrosion à dépôts foisonnant de couleur gris sombre, vert sombre et gris clair. Ils sont associés des bubons, des patelles, des croûtes et des crevasses. Deux échantillons ont été prélevés de l'extrémité de la douille pour étudier les coupes transversale et longitudinale de l'ensemble plaques/douille. Un troisième échantillon a été prélevé pour étudier la coupe longitudinale de la lame. Des analyses d'isotopes du plomb ont été également effectuées pour déterminer la provenance du cuivre utilisé dans l'alliage constituant cette arme.

L'échantillon prélevé du tranchant au niveau de la pointe de la lame présente des grains polygonaux allongés, des macles mécaniques et des inclusions de sulfure de cuivre allongées. L'échantillon prélevé pour étudier la coupe longitudinale de la douille est presque entièrement corrodé. Cependant, une couche de brasure présentant des dendrites corrodées entourées de phases eutectiques a été identifiée. L'échantillon prélevé pour étudier la coupe transversale de la douille du côté du joint présente au moins une douille et deux plaques (Fig. 16) jointes par une brasure en alliage cuivre-argent. Celle-ci est partiellement corrodée. Sa partie non-corrodée (Fig. 16) est observée à plus de 3mm du joint. Toutes les douilles présentent des structures recristallisées et des inclusions de sulfure de cuivre allongées.

L'alliage utilisé pour la fabrication de l'arme est un bronze à 8 Wt.% d'étain. Il contient également 0.7 Wt.% d'arsenic et de faibles quantités de fer et de soufre. La plaque inférieure (1) est faite à partir d'un bronze à 8 Wt.% d'étain et contient également 0.5 Wt.% d'arsenic. La plaque supérieure ou

moyenne (2) située juste au dessus de la plaque inférieure (1) a été réalisée à partir d'un bronze à 7 Wt.% d'étain et contient de faibles quantités de soufre. L'alliage argent-cuivre utilisé comme brasure contient 39 Wt.% de cuivre ainsi que 3 Wt.% d'étain et de faibles quantités de magnésium. La présence de l'étain peut être due à une diffusion de cet élément à partir des douilles en bronze.

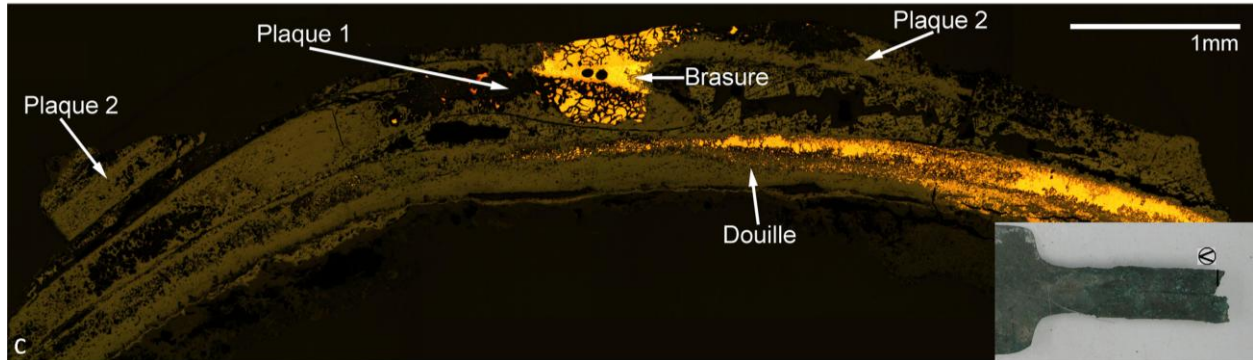


Figure 16 : coupe présentant la douille, les deux plaques ajoutées (1 et 2) et l'emplacement de la brasure en alliage argent-cuivre (Microscope optique en réflexion).

Pointe de lance à douille courte 11200



Long. totale : 197 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 75 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 20 mm	Ep. joint zone proximale : 0.3 mm
Ep. Max. de la lame : 9 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 11 mm x 11 mm à 15mm x 15 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 19 mm	Ep. Opp. joint zone proximale : 0.4 mm
Poids : 54 g	

Cette pointe de lance provient du dépôt ξ du *champ aux offrandes* (Dunand, 1954 ; 339, 1950 ; 70). Elle a subi des cassures au niveau de la lame et de la « zone proximale » inférieure où la douille est pliée vers l'extérieur. La cassure du tranchant au niveau de la lame a révélé qu'une partie de la lame est atteinte par de la corrosion de type lamellaire. L'arme est recouverte d'une couche de corrosion homogène peu rugueuse de couleur gris sombre. Nous avons également détecté sur l'ensemble de l'objet des bubons, des crêtes et des plages rugueuses de couleurs vert et gris clair. Deux échantillons ont été prélevés pour observer les coupes et les surfaces polies de la partie inférieure de la « zone proximale ».

Les inclusions de sulfure de cuivre dans la « surface de joint » de la « zone proximale » sont parallèles par rapport à l'axe et présentent un facteur ($f_{f\ moy.}$) de forme de 6. Elles ont été mesurées sur une parcelle trapézoïdale de l'échantillon dont la longueur maximale est de 2340 μm et la largeur maximale de 1900 μm . L'épaisseur varie entre 240 μm et 280 μm . Le facteur de forme ($f_{f\ moy.} = 7$) mesuré à partir de la coupe transversale est en concordance avec celui mesuré sur la surface polie de l'échantillon.

Les inclusions de sulfure de cuivre dans le côté opposé au joint de la « zone proximale » sont perpendiculaires par rapport à l'axe avec un facteur de forme de 7. Elles ont été mesurées sur une parcelle quasi-rectangulaire de longueur maximale de 1370 μm et de largeur maximale de 810 μm . L'épaisseur varie entre 340 μm et 370 μm . Le facteur de forme ($f_{f\ moy.}$) calculé à partir de la section longitudinale est de l'ordre de 10.

Le métal employé pour la fabrication de cette pointe de lance est un cuivre à 2 Wt.% d'arsenic avec des impuretés comme le fer.

Pointe de lance à douille courte 56064



Long. totale : 81 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 48 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 27 mm	Ep. joint zone proximale : 0.7 mm (T.C.)
Ep. Max. de la lame : 8 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 10 mm x 13 mm à 12mm x 12 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 8 mm	Ep. Opp. joint zone proximale : 1 mm (T.C.)
Poids : 29 g	

Cette pointe de lance provenant du site du Khariji a été découverte dans le carré 35 de la *chambre funéraire 2* (Saidah, 1994). L'arme a perdu une partie de sa douille suite à une cassure. Elle est recouverte d'une couche de corrosion à dépôts foisonnant de couleur vert brun clair. Un échantillon a été prélevé pour observer la coupe longitudinale de la pointe de la lame.

L'échantillon présente des grains polygonaux équiaxes associés à des macles thermiques. Cependant, des grains polygonaux légèrement allongés et des macles mécaniques ont été observés à proximité de l'extrémité du tranchant au niveau sa surface.

Le métal employé pour la fabrication de cette pointe de lance est un bronze à 7 Wt.% d'étain. Il contient également environ 1 Wt.% d'arsenic et 1 Wt.% de plomb.

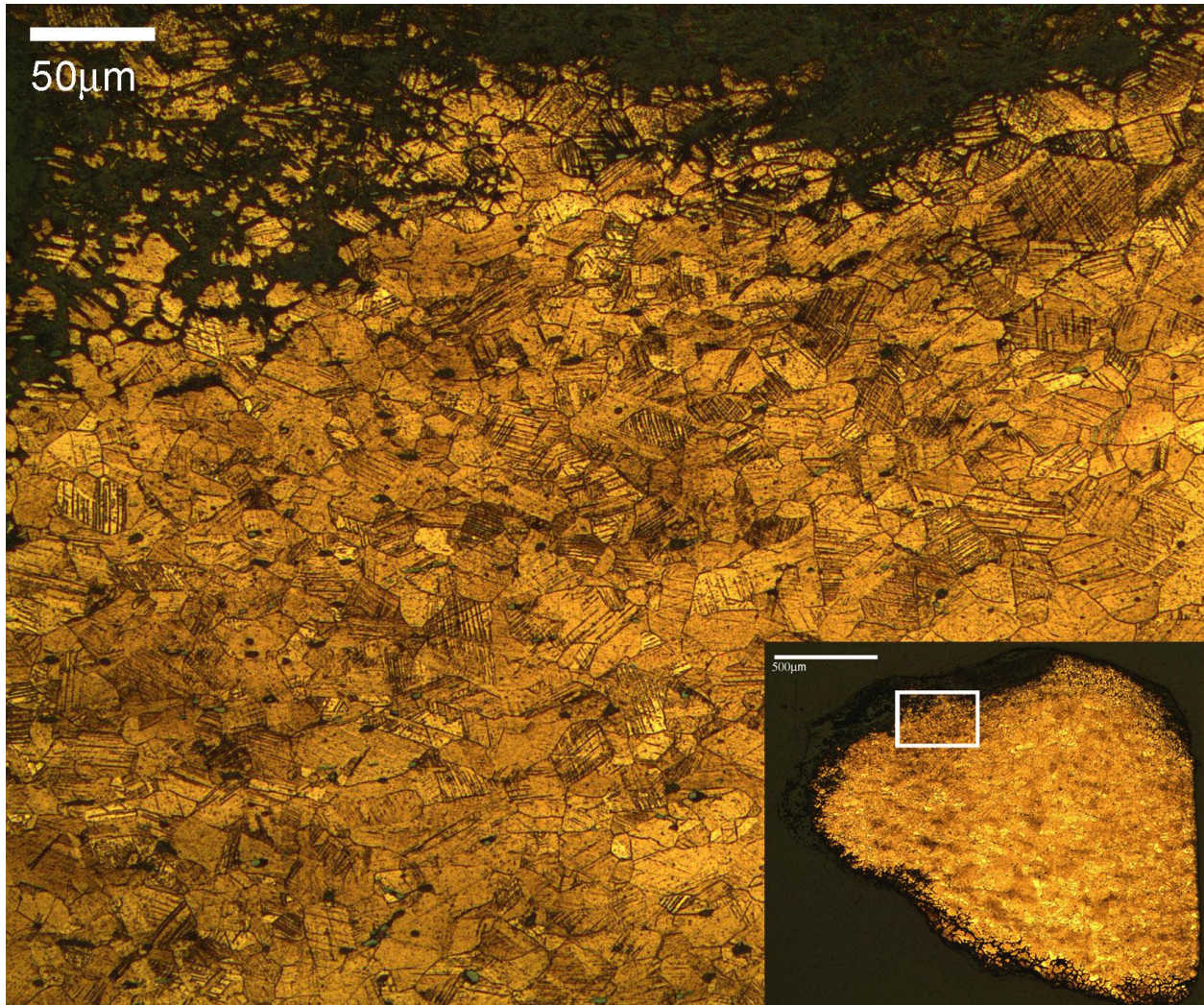


Figure 17 : coupe longitudinale de la pointe présentant (carré blanc sur la petite micrographie) des grains polygonaux écrouis (Microscope optique en réflexion, attaque FeCl_3).

Pointe de lance à douille courte 56066



Long. totale : 102 mm	Ep. joint zone distale :
Long. de lame : 59 mm	Ep. joint zone centrale :
Larg. de lame : 21 mm	Ep. joint zone proximale : 0.8 mm (T.C.)
Ep. Max. de la lame : 9 mm	Ep. Opp. joint zone distale:
Dim. section douille : 9 mm x 13 mm à 14 mm x 15 mm	Ep. Opp. joint zone centrale :
Long. "partie fermée" : 6 mm	Ep. Opp. joint zone proximale : 0.8 mm (T.C.)
Poids : 31 g	

Cette pointe de lance provenant du site du Khariji (Saidah, 1994) a été découverte dans la *chambre funéraire* 2. L'arme est cassée au niveau de la lame et de la douille à qui il manque une partie de la « zone centrale ». L'ensemble de la pointe de lance est recouverte par une couche de corrosion à dépôts foisonnant de couleur vert clair, gris sombre et gris clair. Elle comporte des croûtes et des bubons. Un échantillon a été prélevé de la « zone centrale » pour observer la coupe et la surface au niveau de la « surface de joint ».

L'échantillon présente des inclusions de sulfure de cuivre allongées et des grains polygonaux équiaxes révélés par la corrosion qui a affecté les joints des grains. 67 Wt.% des inclusions de sulfure de cuivre mesurées sont obliques à l'axe de l'arme, les autres sont parallèles à l'axe. Le facteur de forme de ces inclusions dans ces deux directions est de 3. Ces mesures ont été réalisées sur une surface trapézoïdale de 1450 µm de base et 650 µm de hauteur. L'épaisseur de l'échantillon varie entre 500 µm et 450 µm (section transversale).

L'alliage employé pour la fabrication de cette pointe de lance est un bronze à 5 Wt.% d'étain. Il contient également environ 1 Wt.% d'arsenic.