



HAL
open science

Restituer les couleurs des bronzes antiques et de leurs traitements de surface : une approche par l'archéologie expérimentale

Jonathan Devogelaere

► To cite this version:

Jonathan Devogelaere. Restituer les couleurs des bronzes antiques et de leurs traitements de surface : une approche par l'archéologie expérimentale. Maud Mulliez. Restituer les couleurs. Le rôle de la restitution dans les recherches sur la polychromie, en sculpture, architecture et peinture murale/Reconstruction of Polychromy. Research on Polychromy in Ancient Sculpture, Architecture and Wall-painting: the Role of Reconstructions. Actes du colloque Virtual Retrospect (29-30 novembre et 1er décembre 2017), 8, Ausonius Éditions, pp.149-159, 2019, Archeovision. hal-02459187

HAL Id: hal-02459187

<https://hal.science/hal-02459187>

Submitted on 29 Jan 2020

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.

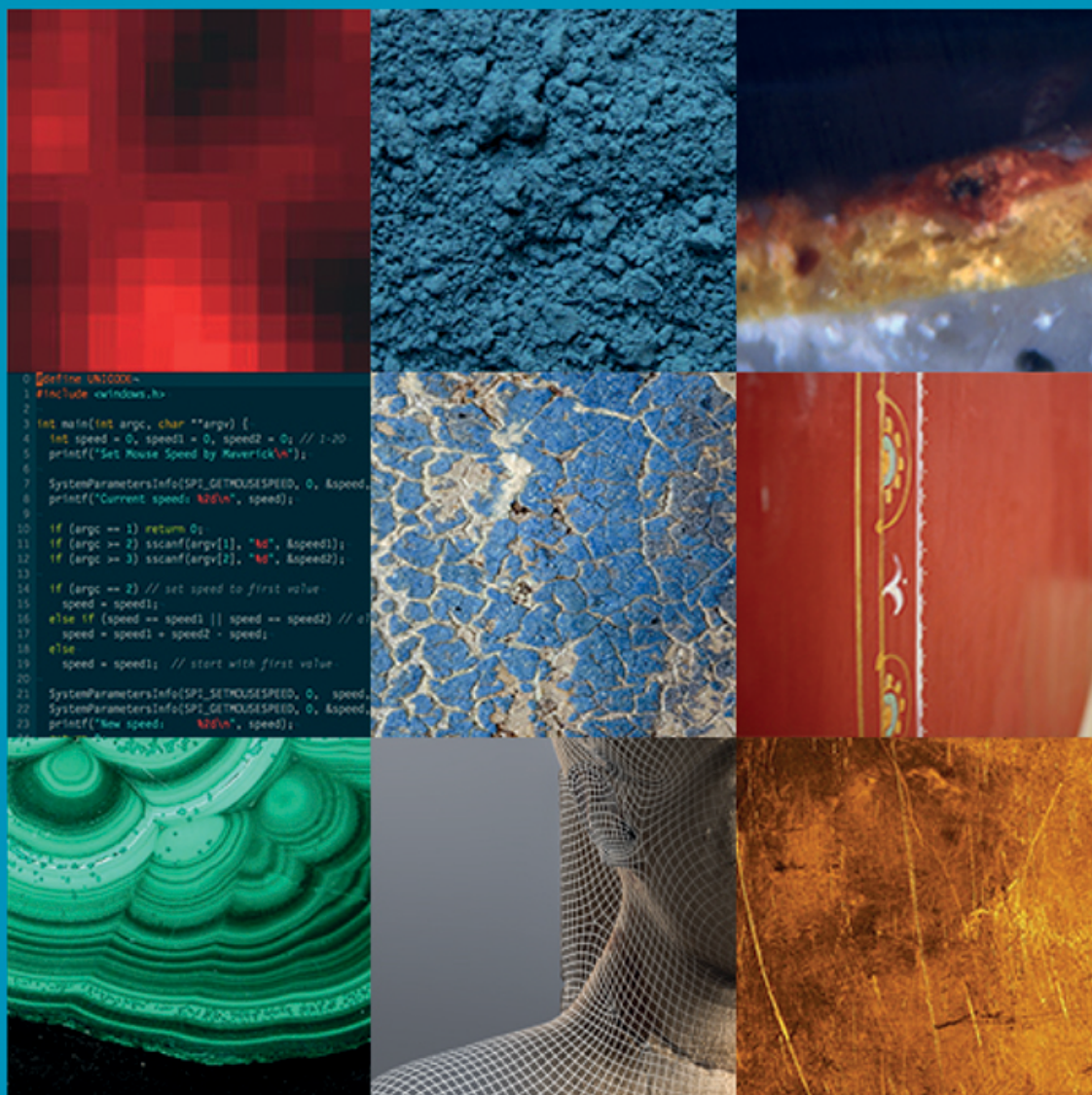


Archeovision

Restituer les couleurs Reconstruction of Polychromy

VIRTUAL RETROSPECT

Actes du colloque de novembre-décembre 2017



Restituer les couleurs

Reconstruction of Polychromy

Actes du colloque
29-30 novembre et 1^{er} décembre 2017

Ausonius - UMR 5607
Maison de l'Archéologie
Université Bordeaux Montaigne
F - 33607 Pessac cedex
<http://ausoniuseditions.u-bordeaux-montaigne.fr>



Directeur des publications : Sophie Krausz
Secrétaire des publications : Nathalie Pexoto
Graphisme de couverture : Nathalie Pexoto

Éditeur scientifique : Maud Mulliez
Comité scientifique :
Brigitte Bourgeois, Conservateur général, C2RMF
Harikleia Brecoulaki, Chercheur, National Hellenic Research Foundation, Institute of Historical Research
Alexandra Dardenay, Maître de Conférences, Université Toulouse Jean-Jaurès
Adeline Grand-Clément, Maître de Conférences, Université Toulouse Jean-Jaurès
Xavier Granier, Professeur, Institut d'optique graduate school
Paolo Liverani, Professeur, Università degli Studi di Firenze
Maud Mulliez, Docteur en histoire de l'art et archéologie, ArScAn (UMR 7041)/ Archeovision (UMS 3657)
Jan Stubbe Østergaard, Conservateur émérite, Ny Carlsberg Glyptotek
Agnès Rouveret, Professeur émérite, Université Paris Nanterre
Giovanni Verri, Maître de Conférences, The Courtauld Institute of Art

Directeur de la collection Archeovision : Rémy Chapoulie

Imprimerie : SEPEC Numérique
Z.I. des Bruyère
01960 Peronnas
www.sepec.com

© AUSONIUS 2019
ISSN : 1771-5911
EAN : 9782356133380



Archeovision

Restituer les couleurs

Le rôle de la restitution
dans les recherches sur la polychromie,
en sculpture, architecture et peinture murale

Reconstruction of Polychromy

Research on Polychromy in Ancient Sculpture,
Architecture and Wall-painting:
the Role of Reconstructions

Collection Archeovision
Volume 8

AUSONIUS ÉDITIONS

Ouvrage publié avec le soutien du programme ANR VESUVIA PSE UBM

— Bordeaux 2019 —

Sommaire

X. GRANIER, R. CHAPOULIE <i>Avant-propos</i>	7
M. MULLIEZ <i>Introduction</i>	9

Section 1 : Peinture & mosaïque

Retrouver les couleurs, combler les lacunes Rediscovering Colours, Filling Gaps	
A.-M. GUIMIER-SORBETS, A. GUIMIER <i>Tenter de reproduire les couleurs antiques du décor architectural : études de cas de mosaïques et de peintures</i>	15
A. BARBET <i>Restituer les couleurs d'une peinture restaurée</i>	25
F. FERNETTI <i>Giotto à Assise et Padoue : une reconstitution de l'état primitif des cycles picturaux</i>	35
Reconstitution matérielle : retrouver matériaux, gestes et outils Physical Reconstruction : Rediscovering Materials, Gesture and Tools	
H. TAVIER <i>Les plafonds peints des chapelles funéraires de la Nécropole Thébaine. Reconstructions expérimentales</i>	45
Nouvelles technologies, image numérique et approche expérimentale Emerging Technologies, Digital Imaging and Experimental Approach	
S. DERMECH <i>Le temple de Tell 'Uqair (IV^e millénaire a.C., Irak): essai de restitution du décor intérieur et extérieur</i>	57
A. DARDENAY, M. MULLIEZ, P. MORA <i>Reconstruction of ancient wall paintings: digital painting and three-dimensional restoration of the House of Neptune and Amphitrite in Herculaneum</i>	67
P. TOMASSINI <i>Restituer les fragments, restaurer les parois : l'infographie au service de la peinture murale à Ostie</i>	79
B. MULLER, J.-C. MARGUERON, N. BRESCH, L. ESPINASSE <i>Place de la peinture murale dans la restitution du Grand Palais Royal de Mari (c. 2000-1760 a.C.)</i>	87

Section 2 : Architecture

Analyses et mesures, retrouver les couleurs, combler les lacunes Analysis and Measurement Techniques, Rediscovering Colours, Filling Gaps	
F. BLAKOLMER <i>Les styles chromatiques dans l'Égée de l'Âge du Bronze et le problème de l'architecture polychrome</i>	103
J. BLID <i>Architectural Polychromy at Hekatomnid Labraunda</i>	113

Nouvelles technologies, restitution 3D & image numérique
Emerging Technologies, 3D Reconstruction and Digital Imaging

J. ROLLIER-HANSELMANN

Restituer la polychromie médiévale sculptée et peinte : quelques exemples romans et gothiques **125**

P. CALLET

De Saint-Denis à Royaumont – Du pigment au pixel **135**

Section 3 : Sculpture & relief

Analyses, mesures & approche expérimentale
Analysis, Measurement Techniques & Experimental Approach

J. DEVOGELAERE

Restituer les couleurs des bronzes antiques et de leurs traitements de surface : une approche par l'archéologie expérimentale **149**

Nouvelles technologies, restitution 3D & image numérique
Emerging Technologies, 3D Reconstruction and Digital Imaging

D. LABOURY, M. MULLIEZ, F. DANIEL

Étude du buste d'Akhénaton du musée du Louvre par sa restitution 3D polychrome **163**

S. PANNUZI, D. FODARO, G. GALANTI, D. MONTEMAGGIORI, N. PAGANI, M. VALENZUELA,

Il dossale d'altare dell'antica Cattedrale di Orte (Viterbo): restauro e ricostruzione virtuale delle successive fasi della decorazione policroma e dorata **173**

Section 4 : Muséographie

Reconstitution matérielle & usage numérique
Physical Reconstruction & Digital Technologies

J. S. ØSTERGAARD

The polychromy of ancient sculpture: experimental reconstructions in permanent museum displays **187**

A. GRAND-CLÉMENT, M. MULLIEZ

Rituels grecs en couleurs : les dessous chromatiques d'une exposition polysensorielle **197**

Section 5 : Perspectives actuelles

Couleurs historiques, réception & création contemporaine
Historic Colours & Contemporary Creation

C. BÉGUIN

Les visiteurs de musées face aux restitutions polychromes de la statuaire antique **211**

T. A. BESNARD

Un Revival haut en couleur ! (Re)présenter la polychromie antique dans la sculpture contemporaine **219**

M.-P. SERVANTIE

Pour une conservation du patrimoine et du paysage architectural coloré d'aujourd'hui : méthode de prise en compte des caractéristiques chromatiques d'un site **227**

Restituer les couleurs des bronzes antiques et de leurs traitements de surface : une approche par l'archéologie expérimentale

Jonathan Devogelaere, Docteur, Aix Marseille Univ, CNRS, CCJ,
LabexMed, Aix-en-Provence, France
devogelaere@mmsch.univ-aix.fr

Résumé : La surface d'un alliage cuivreux, tel que le bronze, nous apparaît souvent d'une couleur verte : ce n'est pourtant pas son apparence d'origine. L'objet antique en bronze – éléments de meuble d'apparat hellénistico-romain dans le cas de notre étude – présentait au contraire une ou plusieurs couleurs éclatantes, moins ternes que ne le laisse à penser son aspect visuel après plusieurs siècles d'enfouissement. Le croisement des données issues de sources variées (mobiliers archéologiques, littérature antique, résultats d'analyses physico-chimiques, recettes d'alchimistes) a permis de réaliser, par l'expérimentation, un nuancier des bronzes antiques et de divers traitements de surface (traitement plastique, incrustation, dorure, patine). Ce nuancier permet ainsi d'envisager une large gamme des couleurs potentielles de cet alliage et de restituer les rendus polychromes de sa surface.

Mots-clés : bronze antique, alliage cuivreux, nuancier, couleur, éclat, métallurgie, fonte à la cire perdue, traitement de surface, patine, archéologie expérimentale.

Abstract: The copper alloy surface, such as bronze, often appears green to us. However, it is not its original appearance. On the contrary, antique bronze objects – pieces of Hellenistico-Roman furniture in the case of our study – had one or several brilliant colours, less dull than its actual visual appearance suggests after several centuries of being buried. The cross-referencing of data from various sources (archaeological objects, ancient literature, physico-chemical analyses, recipes of alchemists) made it possible to produce, through experimentation, a colour palette of antique bronzes and various surface treatments (plastic treatment, inlay, gilding, patina). Thus, this colour palette allows to consider a wide spectrum of possible alloy colours and to regain colourful renderings of its surface.

Keywords: antique bronze, copper alloy, colour palette, colours, brightness, metallurgy, lost-wax casting, surface treatment, patina, experimental archaeology.

INTRODUCTION¹

L'expérimentation archéologique se développe depuis quelques années autour des bronzes antiques ; cette approche vise à en comprendre et en restituer les couleurs, qu'elles soient dues à la composition élémentaire de l'alliage ou à un traitement de surface appliqué à sa surface². Dans la continuité de cette démarche scientifique et dans le cadre de ma thèse de doctorat, un nouveau projet a été mis en œuvre, faisant collaborer le monde universitaire et la fonderie d'art, et a abouti à la création d'un nuancier des bronzes antiques³.

1. Ce travail a été réalisé dans le cadre du laboratoire d'excellence LabexMed – Les sciences humaines et sociales au cœur de l'interdisciplinarité pour la Méditerranée portant la référence 10-LABX-0090. Il a bénéficié d'une aide du gouvernement français au titre du Programme Investissements d'Avenir, Initiative d'Excellence d'Aix-Marseille Université - A*MIDEX. Je tiens par ailleurs à remercier les organisatrices du colloque Reconstruction of Polychromy // Restituer les couleurs, Maud Mulliez et Caroline Delevoie, ainsi que l'ensemble des membres du comité scientifique qui ont retenu ma contribution. J'adresse également mes remerciements à mon directeur de thèse Philippe Jockey, non moins que mon laboratoire et Jacques Rebière, qui ont dès le début soutenu le projet. Je suis très reconnaissant envers Laurent Inquimbert et son équipe pour leur aide et leur disponibilité, sans qui le nuancier présenté ici n'aurait jamais pu se faire. Je remercie enfin Philippe Walter et Matthias Alfeld pour leurs conseils concernant les données archéométriques.

2. Nous pouvons citer les travaux dirigés par Edilberto Formigli sur la statue romaine en bronze de l'*Idolino* de Pesaro (Bertelli *et al.* 2013), les travaux dirigés par Vinzenz Brinkmann sur les deux guerriers de Riace (Brinkmann 2015), l'étude du musée romain d'Avenches sur les lits de table en bronze découverts dans cette cité antique (Duvauchelle *et al.* 2013, 107-108) et les expérimentations de François Mathis sur les patines à partir de recettes japonaises (Mathis 2005, 277-294).

3. Ce nuancier est actuellement exposé dans le parcours permanent de la salle "Proche-Orient, bassin méditerranéen" au musée d'archéologie méditerranéenne de Marseille, située à la Vieille Charité, depuis sa réouverture le 8 mars 2019.

Le nuancier est un outil primordial car il permet de retrouver et d'apprécier les couleurs des bronzes, des patines et autres traitements de surface qui ont, malheureusement, partiellement ou totalement disparu de nos jours. Il a été réalisé dans le cadre d'expérimentations et en collaboration avec un fondeur d'art, Laurent Inquimbert⁴, qui a mis à ma disposition son atelier et ses compétences professionnelles pour la création du nuancier. J'ai ainsi pu observer et effectuer les gestes du fondeur composant la chaîne opératoire de fabrication et de décoration d'objets en bronze. Le nuancier se présente sous la forme d'une centaine de plaquettes mesurant 5 cm par 3 cm et réalisées en fonte pleine à la cire perdue, qui est un procédé technique permettant de réaliser une pièce métallique, généralement en alliage cuivreux, à partir d'un modèle en cire. Le protocole de ce nuancier a été conçu autour de trois notions : la colorimétrie, le bronze et l'archéologie expérimentale.

La colorimétrie est la mesure de la couleur à partir de trois propriétés : la tonalité qui permet de positionner une couleur dans le spectre visible, du violet au rouge ; la clarté qui correspond à la variation de l'intensité lumineuse réfléchie ; la saturation qui caractérise l'intensité chromatique d'une teinte⁵. Les propriétés physiques des couleurs des plaquettes ont été mesurées sur la base de la Charte des couleurs de Munsell qui détermine cinq teintes de base – rouge (R), jaune (Y), vert (G), cyan (B) et violet (P) – et cinq teintes intermédiaires – orange (YR), vert-jaune (GY), cyan foncé (PB) et magenta foncé (RP).

Le bronze est un alliage binaire de cuivre (Cu) et d'étain (Sn), qui devient ternaire avec un ajout de plomb (Pb). Le bronze est instable et cherche à se stabiliser avec son milieu environnant, il tend naturellement à retourner à un état initial de minerai et se recouvre d'une corrosion terne, que l'on nomme patine naturelle. Nous perdons alors la couleur originelle de l'alliage ; c'est dans cet état que nous retrouvons les objets archéologiques enfouis ou immergés depuis plusieurs siècles et qui sont généralement recouverts d'une corrosion verte.

Dans le cadre de cet article, nous avons choisi, comme objet d'étude pour servir d'exemple principal à notre présentation, la garniture du champ médian d'une applique de *fulcrum*, c'est-à-dire l'applique d'un accoudoir de lit de table, découverte sur l'escalier d'une cave d'une *taberna* de Corinthe et datant du I^{er} s. p.C. (fig. 1 et 2). Il s'agit d'un bronze à 5 % d'étain et 1 % de plomb⁶, décoré par incrustation d'une acanthe arborescente en argent, en cuivre rouge et probablement en "bronze de Corinthe" noir⁷.

L'archéologie expérimentale est une discipline scientifique qui vise à la compréhension des techniques, des usages et des fonctions de vestiges archéologiques par l'expérimentation. Elle permet de tester des hypothèses fonctionnelles définies

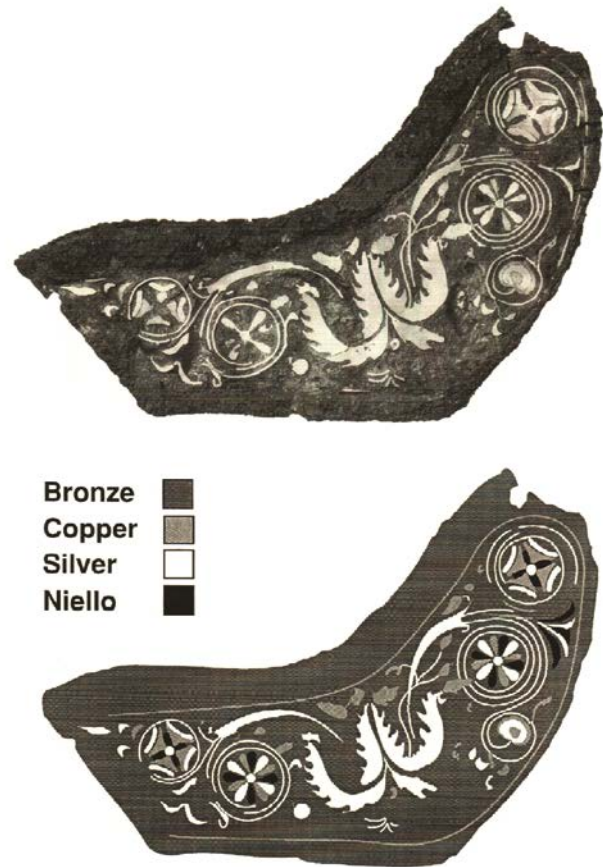


Fig. 1. Garniture du champ médian d'applique de *fulcrum*, Corinthe, I^{er} s. p.C., photo et dessin, musée archéologique, Corinthe, inv. MF-76-24 (d'après Mattusch 2003, fig. 13.1 et p. 220).

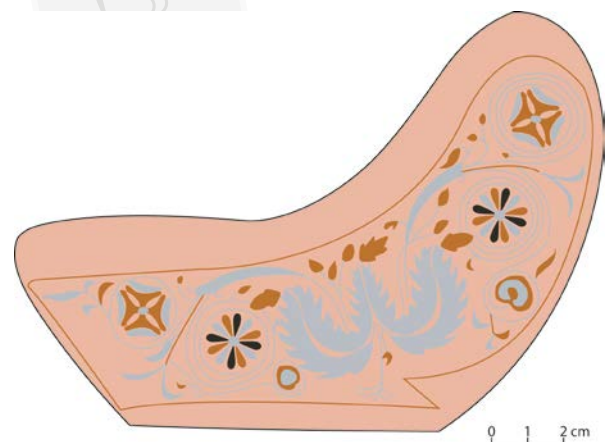


Fig. 2. Dessin de restitution coloré du bronze et du décor d'une acanthe arborescente de la garniture du champ médian de Corinthe (id. fig. 1) (© J. Devogelaere).

4. Laurent Inquimbert a reçu le titre de Meilleur Ouvrier de France 2015 dans la spécialité Fonderie d'Art - Cire perdue ; son atelier est basé à Carcès dans le Var (France).

5. Dordet 1990 ; Oleari 2008.

6. Mattusch 2003, 221.

7. Le "bronze de Corinthe" noir serait dans l'ensemble davantage à privilégier que le niello, selon les études les plus récentes sur le sujet (Aucouturier et al. 2017, 117 ; Descamps-Lequime 2006a, 85-92).

par un protocole établi au préalable. L'observation, la reconstitution et la comparaison des résultats obtenus par l'expérimentation avec les objets archéologiques sont les trois fondements complémentaires de l'archéologie expérimentale. Des limites apparaissent, néanmoins, dans ce processus, telles que le manque d'expérience ou l'absence de contextes culturel et artisanal d'origine avec par exemple l'utilisation de matériel contemporain⁸.

Dans cet article qui vise à restituer les couleurs des bronzes antiques, tant à partir de l'étude de leur composition élémentaire que de leur rendu superficiel, nous allons détailler les alliages et les traitements de surface choisis pour réaliser le nuancier expérimental, les techniques utilisées, les résultats issus des expérimentations, ainsi que les exemples archéologiques, iconographiques et littéraires qui ont permis de définir le protocole, d'appuyer les hypothèses et de nourrir la réflexion. La première partie de cette présentation est centrée sur les couleurs des bronzes antiques ; la seconde concerne plus particulièrement les couleurs par traitement de surface et le rendu polychrome d'un objet.

CONCEPTION, PRODUCTION ET COULEURS DES BRONZES EXPÉRIMENTÉS

Composition élémentaire des alliages : bronzes et "bronze de Corinthe"

Les alliages composant le nuancier ont été créés à partir de résultats archéométriques provenant d'éléments de meuble en bronze hellénistico-romain, recueillis dans

diverses publications⁹. Ces résultats ont permis de définir dix bronzes différents (fig. 3). Chaque alliage a été produit pour une quantité de 3 kg¹⁰, correspondant à un moule de dix plaquettes. Les métaux composant les alliages – cuivre, étain, et parfois plomb – ont été minutieusement pesés et une numérotation a été préalablement établie dans le protocole. Les alliages ont donc été numérotés dans un premier temps sur chaque moule, puis sur chaque plaquette. Le premier numéro inscrit, allant de 1 à 11, correspond à un type d'alliage et le second, allant également de 1 à 11 et qui sera détaillé ultérieurement, correspond à la recette d'une patine. Les six premiers bronzes sont une moyenne des alliages connus par les données archéométriques recueillies sur les objets archéologiques étudiés : les trois premiers (les numéros 1 à 3) correspondent à des alliages binaires avec respectivement une teneur en étain de 8 %, 10 % et 12 % ; les trois autres alliages (les numéros 4 à 6) sont des alliages ternaires avec les mêmes compositions que les trois premiers à cela près que 2 % de plomb ont été ajoutés.

Les quatre derniers alliages (les numéros 7 à 10) correspondent à des compositions élémentaires d'objets archéologiques spécifiques, tel que l'alliage n° 7 qui reprend la composition de l'alliage de l'élément central décorant l'applique du *fulcrum* du lit de Corinthe (fig. 1 et 2).

L'étain et le plomb améliorent la coulabilité de l'alliage et ils abaissent son point de fusion. Cependant, la teneur en étain ne doit pas excéder 20 % pour éviter que le bronze ne soit trop fragile et cassant, tandis que celle du plomb ne dépasse généralement pas les 5 % – excepté dans le cas des alliages singuliers comme le bronze au plomb (alliage n° 10) – afin

Numéro	Alliage	Cu	Sn	Pb	Ag	Au	Total (g)
1	CuSn8	2760	240	0	0	0	3000
2	CuSn10	2700	300	0	0	0	3000
3	CuSn12	2640	360	0	0	0	3000
4	CuSn8Pb2	2700	240	60	0	0	3000
5	CuSn10Pb2	2640	300	60	0	0	3000
6	CuSn12Pb2	2580	360	60	0	0	3000
7	CuSn5Pb1	2820	150	30	0	0	3000
8	CuSn15Pb4	2430	450	120	0	0	3000
9	CuSn9Pb9	2460	270	270	0	0	3000
10	CuSn8Pb14	2340	240	420	0	0	3000
11	CuAg4Au1	28,5	0	0	1,2	0,3	30
Total (g)		26098,5	2910	1020	1,2	0,3	30030

Fig. 3. Composition élémentaire des alliages des plaquettes (© J. Devogelaere).

8. Reynolds 1994 ; Reynolds 1999.

9. Pour la liste complète des données archéométriques recueillies, voir Devogelaere 2018, 675-726 (Annexe 2).

10. Sauf pour le "bronze de Corinthe", voir infra.

d'éviter le phénomène de liquation, c'est-à-dire une possible séparation au moment de la coulée du métal très fusible, tel que le plomb, avec les autres métaux moins fusibles¹¹.

Le "bronze de Corinthe" n'est en réalité pas un bronze, car il ne contient pas d'étain, mais un alliage cuivreux avec de faibles teneurs en or (Au) et en argent (Ag). Il est connu dès l'époque mycénienne et il est très prisé par les Romains, surtout dans les incrustations¹².

Le "bronze de Corinthe" expérimenté contient 4 % d'argent et 1 % d'or (fig. 3, alliage n°11). Sa composition élémentaire provient d'un décor incrusté sur une garniture du champ médian d'applique de *fulcrum* découverte aux Roches-de-Condrieu et datant du 1^{er} s. p.C.¹³. Seulement 30 g de cet alliage ont été produits dans le cadre de cette expérimentation, contrairement aux autres alliages.

Fabrication des plaquettes : fonte pleine à la cire perdue

Le processus de fabrication, pour réaliser les plaquettes, est la fonte pleine à la cire perdue dans des moules de coulée en grappe. La technique de la fonte pleine est suffisante pour confectionner des plaquettes rectangulaires de quelques centimètres qui ne présentent aucune contrainte particulière lors de la coulée. La technique de la fonte à la cire perdue est par ailleurs parfaitement maîtrisée aux époques hellénistique et romaine. En effet, la technique de la fonte pleine à la cire perdue est connue dans le monde grec dès le VIII^e s. a.C., comme l'atteste de nombreuses découvertes de petites statuette animales votives¹⁴. Quant à la technique de coulée des statues en bronze creux dans des moules, cette amélioration technique aurait été inventée au cours du VI^e s. a.C. par deux Samiens, Rhécus et Théodore, comme le rapporte Pausanias (Paus. 8.14.8 ; 10.38.6) ; les étapes de fabrication sont de plus détaillées sur la célèbre *kylix* à figures rouges attique, nommée la Coupe du Peintre de la Fonderie (fig. 4).

Modèle en cire et moule

La chaîne opératoire du moule de coulée, réalisée lors des expérimentations, débute par le modelage en colophane du maître-jet (axe central) couronné d'un pot de coulée (entonnoir), puis par celui des plaquettes. Elles sont assemblées avec de la cire par paquet de dix autour du maître-jet pour former une grappe et sont disposées vers le bas et de manière oblique pour faciliter la coulée du bronze (fig. 5). Des événements, qui servent à évacuer l'air et les gaz lors de cette opération, ne sont pas nécessaires pour des moules si simples.



Fig. 4. *Kylix à figures rouges attique du Peintre de la Fonderie, Vulci, début du V^e s. a.C., vue extérieure de la coupe, Antikensammlung, Berlin, inv. F2294* (© Antikensammlung der Staatlichen Museen zu Berlin, Ingrid Geske).

Le modèle en cire est ensuite recouvert d'un moule. Ce dernier doit résister à la haute température du four et à la pression du métal en fusion. Le moule se compose d'un enrobage réfractaire mixte (ERM), c'est-à-dire une barbotine de chaux et de chamotte (céramique broyée). Une première couche d'impression est appliquée à la surface du modèle, elle donnera l'aspect extérieur du bronze, puis six autres couches sont accumulées avec un temps de séchage d'au moins six heures entre chaque revêtement.

Les moules sont enfin mis au four, pot de coulée vers le bas, pour le décirage et la cuisson. La température du four doit progressivement monter jusqu'à atteindre 750 °C et la cuisson dure une heure et demi. À 550 °C, la cire se sublime et laisse un espace vide qui sera par la suite rempli de bronze.

Coulée et travail à froid

Une première coulée de chaque alliage est réalisée en lingot. Elle sert à les affiner pour éviter la ségrégation des métaux, car le cuivre et l'étain se mélangent mal en une seule fusion. De plus, l'ordre de chargement des métaux dans le creuset chaud est primordial pour un résultat optimal ; le cuivre est introduit en premier car il a un haut point de fusion, puis l'étain et le plomb sont ajoutés, une fois le cuivre fondu. La perte au feu de ces métaux est minime avec 0,5 % pour le cuivre et 1 à 2 % pour l'étain¹⁵.

La coulée principale se fait donc dans un second temps. Le moule cuit est réchauffé à environ 500 °C pour permettre une meilleure coulée et il est partiellement enterré dans du sable pour empêcher, au moment de la coulée, son éclatement sous la pression et les fuites de métal. Le creuset

11. Rama 1995, 279-280.

12. Descamps-Lequime 2006b, 29-34 ; Devogelaere 2018, 48-58 ; Giunilia-Mair & Craddock 1993, 14-26.

13. Mathis 2005, 269-270.

14. Bol 1985, 23-29.

15. Rama 1995, 285.



Fig. 5. Modèle en cire d'une grappe de coulée avec les dix plaquettes (© J. Devogelaere).

contenant le lingot est chauffé à 1000 °C dans un autre four. Avant l'incorporation du lingot, des morceaux de charbon et de verre¹⁶ sont ajoutés pour créer une cuisson réductrice. En effet, ils permettent de brûler l'oxygène et de former une couche hermétique à la surface de l'alliage lors de sa montée en température. L'alliage en fusion est enfin dégrossi de cette couche superficielle et coulé dans le moule. Ces différentes étapes sont effectuées pour chaque alliage dans un moule différent.

Après refroidissement des bronzes, plusieurs travaux à froid sont opérés pour finaliser le processus de fabrication. Le premier travail à froid est le décochage qui consiste à séparer le bronze par la destruction de son moule, puis vient l'ébarbage qui retire les excédents de métal sur la pièce tels que les jets de coulée et les bavures – ainsi que les éventails s'il y en avait. À ce moment, les plaquettes deviennent individuelles et sont marquées de leur premier numéro.

Le dernier travail consiste à polir et à ciseler la surface du bronze pour qu'il ne soit plus "brut de fonderie" et pour éliminer les imperfections et les défauts de coulée. Un outil non coupant, comme un racloir, est utilisé pour ce travail. Il est similaire à ceux représentés sur la Coupe du Peintre de la Fonderie : l'un des deux artisans (celui debout) travaillant sur la statue du guerrier serait en train d'employer cet outil ; de plus, deux racloirs, en forme de strigile, seraient accrochés de part et d'autre de la scène¹⁷ (fig. 4). Néanmoins, si les défauts de coulée sont trop importants, une réparation¹⁸ peut être réalisée.

Cas particulier des expérimentations : "bronze de Corinthe"

Le "bronze de Corinthe" n'est pas, lors de ces expérimentations, réalisé à la cire perdue ; il n'est pas coulé dans un moule mais uniquement dans une lingotière, car la quantité d'alliage n'est pas suffisante. Deux petits lingots sont produits et l'alliage en fusion, lors de la coulée, se révèle très fluide.

Les lingots sont ensuite recuits et martelés pour confectionner quatre plaquettes d'1 mm d'épaisseur. Cette opération met en évidence un alliage très ductile grâce à la présence de l'or.

Résultats des expérimentations : analyse des couleurs

Les dix bronzes ont des couleurs différentes, allant du rouge clair au jaune (fig. 6). Ces couleurs sont toujours vives et

16. Des bâtons de bois vert (saule, acacia, chêne) pouvaient également être utilisés pour cette fonction, comme nous pouvons l'interpréter à travers une mention de Pline l'Ancien concernant la purification du cuivre par l'ajout d'un bâton de chêne pour brûler l'oxygène lors de la fusion (Plin., *Nat.*, 34.20.95).

17. Il est à noter que l'outil situé à la gauche du marteau d'orfèvre accroché au mur est un ciseau courbé, qui est utilisé pour la ciselure. Ces deux outils sont situés dans la partie centrale de la scène ultime.

18. Une réparation est une finition qui consiste à entailler la zone défectueuse, de manière rectangulaire durant l'Antiquité, puis à insérer une fine plaque du même alliage et à polir l'ensemble de la zone pour masquer les imperfections.

Numéro	Alliage	Couleur	Identifiant Munsell
1	CuSn8	Rouge clair	10R 6/8
2	CuSn10	Jaune rougeâtre	7.5YR 8/6
3	CuSn12	Jaune	10YR 8/6
4	CuSn8Pb2	Rouge clair	10R 6/6
5	CuSn10Pb2	Jaune rougeâtre	5YR 7/6
6	CuSn12Pb2	Jaune	10YR 7/6
7	CuSn5Pb1	Rouge clair	7.5R 6/8
8	CuSn15Pb4	Jaune	2.5Y 8/6
9	CuSn9Pb9	Jaune rougeâtre	7.5YR 7/6
10	CuSn8Pb14	Jaune pâle	2.5Y 7/4
11	CuAg4Au1	Rouge	7.5R 5/8

Fig. 6. Couleurs des alliages des plaquettes (© J. Devogelaere).

brillantes après le polissage. Le bronze est flamboyant, de la couleur du feu, oscillant entre le rouge et le jaune rougeâtre. C'est déjà la manière dont Homère en caractérisait le coloris en employant l'adjectif *aithopa*¹⁹ et en comparant sa colorimétrie à celle du vin : "Car Homère appelle *aithopa* non le vin sombre, mais le vin translucide et brillant ; sinon il ne qualifierait pas non plus d'*aithopa* le bronze, 'attribut des guerriers' et 'soutien du regard'" (Plu., *Moralia*, 692F).

Suivant le pourcentage d'étain dans l'alliage, le bronze a ainsi une couleur différente (fig. 7). L'alliage n° 7 qui contient le moins d'étain – 5 % – a la couleur la plus rouge, en raison de la prédominance du cuivre. Les autres alliages tirent vers le rouge clair (alliages n° 1 et 4), jaune rougeâtre (alliages n° 2, 5 et 9), jaune pâle (alliage n° 10) et jaune (alliages n° 3, 6 et 8). La couleur jaune de l'alliage n° 8, dont la teneur en étain est de 15 %, est la plus dorée.

Le pourcentage de plomb affecte quant à lui assez peu la couleur de l'alliage (alliages n° 4, 5 et 6). Le plomb assombrit légèrement la couleur ; il baisse sa saturation. Il en va néanmoins différemment pour le bronze au plomb (alliage n° 10) dont la couleur est jaune pâle. L'explication viendrait de la plus faible teneur en cuivre rouge dans l'alliage, à la différence de l'alliage n° 4, de couleur rouge clair, qui n'a que 2 % de plomb dans sa composition élémentaire.

La couleur originelle de l'élément central ornant l'accoudoir de lit de table découverte à Corinthe, notre objet archéologique d'étude (fig. 1 et 2), reproduite dans l'alliage n° 7, serait donc un rouge clair, qui a été ensuite occulté par la corrosion, conduisant à la teinte vert sombre actuelle.

Le "bronze de Corinthe" conserve, après le polissage, une couleur rouge (fig. 8, plaquette 11.1) en raison de son fort pourcentage de cuivre (fig. 6). Mais dans l'Antiquité, on avait

coutume de patiner l'alliage, afin de lui donner une belle couleur bleu sombre ou gris foncé ou noir aux reflets bleutés comme nous le verrons plus bas²⁰.

Les Grecs de l'époque archaïque emploient sûrement le mot *kuanos* pour désigner ce matériau à la surface bleu sombre ou à l'éclat bleu²¹.

POLYCHROMIE DES BRONZES EXPÉRIMENTÉS PAR TRAITEMENT DE SURFACE

Après sa fabrication, le bronze peut être soumis à un ou plusieurs procédés techniques de coloration et de décoration, par des traitements de surface, pour créer des jeux esthétiques polychromes.

Traitement plastique

Les techniques les plus simples sont réalisées, dès l'Antiquité, par traitement plastique, grâce aux propriétés mécaniques du bronze, tel le martelage avec un écrouissage ou un recuit. Certains traitements de surface se font toutefois avant la coulée, directement sur le modèle en cire. Ils permettent de modeler la cire et de lui donner des effets de matière qui se voient, après la coulée, à la surface du bronze. Des jeux de lumières se créent, en effet, grâce aux différences de réflexion de la lumière incidente et de la perception de l'œil²².

Le polissage est une autre technique antique qui consiste à frotter de façon prolongée le bronze pour en modifier ou en régulariser la surface. Il se fait avec des abrasifs de plus en plus fins pour arriver à un lustrage parfait ; ainsi la surface réfléchit la lumière de manière accentuée grâce aux nombreuses stries créées comme nous le voyons sur les plaquettes (fig. 7).

La pierre ponce est un abrasif utilisé pendant l'Antiquité, ainsi que la roche émeri extraite essentiellement sur l'île de Naxos en Grèce. L'émeri était réduit en poudre, en grains de différentes grosseurs, et mélangé à de l'huile pour être appliqué et polir la surface de l'alliage²³. C'est ainsi que nous pouvons interpréter, nous semble-t-il, le geste d'Héphaïstos représenté sur une amphore de Nola à figures rouges attique datée vers 470 a.C. et attribuée au Peintre de Dutuit (Museum of Fine Arts, Boston, inv. 13.188) : le dieu serait en train de polir, sous le regard de Thétis, le futur bouclier d'Achille à l'aide d'un abrasif, peut-être de la roche émeri appliquée sur un tissu.

De même, sur la Coupe du Peintre de la Fonderie (fig. 4), concernant de nouveau la dernière scène, le second artisan (celui assis) travaillant sur la statue du guerrier serait en train

20. Aucouturier et al. 2017 ; Devogelaere 2018, 109-112.

21. Grand-Clément 2011, 63 et 123.

22. Coluzza & Formigli 2013 ; Formigli 2013b.

23. Boletti 2017.

19. Chantraine 2009, 31-32.

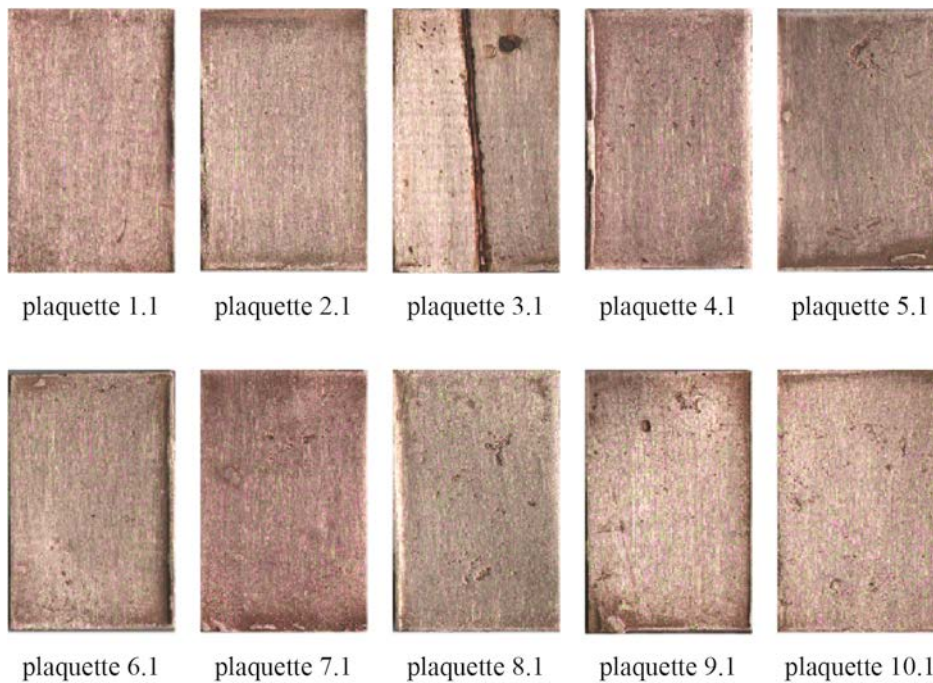


Fig. 7. Couleurs des bronzes (© J. Devogelaere).

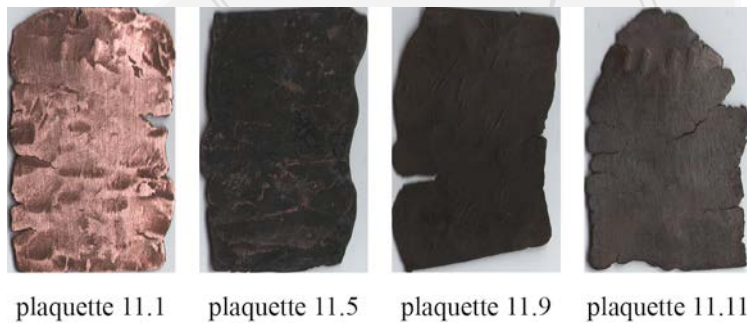


Fig. 8. Couleurs du "bronze de Corinthe" non patiné (plaquette 11.1) et patiné (plaquettes 11.5, 11.9 et 11.11) (© J. Devogelaere).

de réaliser un polissage de finition à l'aide d'un abrasif, soit par émeulage avec une pierre ponce, soit par abrasion avec de l'émeri en poudre. Enfin, aux côtés des raclours accrochés aux murs, deux outils sphériques pourraient symboliser l'un de ces deux abrasifs.

Le traitement plastique du bronze est rendu plus ou moins facile en fonction des pourcentages d'étain et de plomb présents dans l'alliage ; par exemple, un bronze à 10 % d'étain est plus aisé à polir et à ciseler qu'un bronze à 12 %, car l'étain durcit l'alliage, alors que le plomb le rend plus ductile, ce qui permet un meilleur travail à froid.

Incrustation

D'autres traitements de surface pour un rendu polychrome, employés au cours de l'Antiquité, consistent à incruster un autre métal – cuivre rouge, argent, or, "bronze de Corinthe"

noir – à la surface du bronze. Il existe notamment la technique du damasquinage, incrustation d'un fil de métal et la technique du placage, incrustation d'une fine plaque. À partir de la fin du 1^{er} s. a.C., apparaît en plus la technique du double placage, qui est une amélioration technique consistant à superposer deux plaques de différents métaux par incrustation²⁴.

L'acanthé arborescente décorant la garniture du champ médian de l'applique de *fulcrum* du lit de Corinthe (fig. 1 et 2) est réalisée selon les trois techniques conjointes : le buisson d'acanthé est plaqué d'argent et de cuivre rouge, les rinceaux sont damasquinés d'argent, les fleurs sont plaquées

24. Devogelaere 2018, 75-76.

par alternance de cuivre rouge, d'argent et probablement de "bronze de Corinthe" noir et les deux bourgeons sont doublement plaqués de cuivre rouge et d'argent superposés. Lors de l'expérimentation, nous avons réalisé une damasquinure de cuivre rouge et un placage de "bronze de Corinthe" patiné en noir sur la plaquette 3.1 (fig. 7). Les actions de la chaîne opératoire du damasquinage se composent tout d'abord de la création d'une rainure longitudinale à l'aide d'un petit ciseau biseauté. Cet outil permet de retirer des copeaux de matière, de créer des stries au fond de la rainure pour faciliter l'incrustation et de former deux lèvres aux extrémités de la rainure. Le fil de cuivre est ensuite inséré et maintenu en rabattant les lèvres vers l'intérieur, par martelage. La surface de la plaquette est finalement polie pour effacer toutes traces de martelage.

Recouvrement de surface

Il existe enfin plusieurs techniques de décoration par recouvrement, partiel ou total, de la surface du bronze. Cela peut être l'application d'une simple couche d'huile ou de cire qui protège et assombrit la surface (Plin., *Nat.*, 34.9.15 ; 35.51.182), d'une dorure par liaison métallique (dorure au mercure) ou par collage (feuille d'or) qui freine l'oxydation et embellie l'apparence d'un objet²⁵, ou enfin celle d'une patine : c'est ce dernier cas que nous allons plus amplement détailler.

Patine naturelle et patine intentionnelle

La patine est une coloration superficielle, d'éclat non métallique, qui résulte de la présence d'une couche relativement adhérente formée par une attaque chimique du métal lui-même, et particulièrement par l'oxydation du cuivre.

Elle peut se former de manière naturelle ; on parle alors couramment dans ce cas de "corrosion" car la patine résulte de l'action des intempéries, de l'air, de l'oxygène, des agents atmosphériques ou du sol pendant un temps prolongé. Plutarque, dans les *Dialogues pythiques*, rapporte que les statues des amiraux spartiates exposées à Delphes étaient d'un bleu brillant. Il s'agissait probablement d'une patine naturelle due à l'air et aux agents atmosphériques de Delphes : "D'ailleurs, non seulement la ténuité de l'air peut servir à expliquer la formation du vert-de-gris, mais encore c'est elle qui en rend la couleur, à ce qu'il semble, plus agréable et plus brillante, en rehaussant sa teinte bleue de l'éclat lumineux du jour" (Plu., *Moralia*, 396C)²⁶.

La patine peut également être intentionnelle, grâce à l'application à chaud ou à froid d'agents corrosifs (réactifs acides ou basiques). La patine intentionnelle est obtenue plus rapidement que la patine naturelle et permet de donner une couleur souhaitée au bronze, de protéger sa surface contre la

corrosion et de cacher les défauts et traces d'outils apparus lors des activités de fabrication.

Elle est attestée dans certaines sources littéraires²⁷, telles que les recettes de l'alchimiste égyptien Zosime de Panopolis, mais aussi par des sources iconographiques. Le bouclier poli par Héphaïstos sur l'amphore de Nola citée précédemment a en son centre un *gorgonéion* dont les cheveux sont noirs et la langue rouge ; de telles couleurs pourraient résulter de patines intentionnelles. La patine intentionnelle peut enfin être attestée visuellement sur du mobilier archéologique, dans certains cas précis et non sans difficulté. En effet, quand la patine se situe entre la rainure de l'incrustation du damasquinage et le métal incrusté, il est possible de démontrer qu'elle a été réalisée au cours des procédés techniques de décoration²⁸.

Processus de fabrication de la patine

Dans le cadre des expérimentations, les patines intentionnelles ont été faites de manière empirique. Il est souvent difficile de tirer des conclusions du résultat obtenu, car les paramètres du processus de fabrication d'une patine sont multiples : entrent en jeu la composition de la solution, celle de l'alliage et les différents moyens d'application. Suivant la combinaison de ces paramètres, la couleur change. Le second numéro inscrit sur les plaquettes correspond donc à une patine (fig. 9).

La colonne "solution" du tableau énumère les produits utilisés et combinés entre eux pour fabriquer les patines. Ils sont de différentes natures, et parfois dilués avec de l'eau : alcalis (ammoniacque et urine), acides (nitrique, vinaigre de vin), sulfates (alun, soufre minéral), sels (chlorure de sodium, chlorure d'ammonium) et un pigment (hématite).

La colonne suivante montre les différents types d'application de la solution. Il s'agit généralement d'un badigeonnage à chaud ou à froid, mais cela peut aussi être une immersion dans un bain (patine n° 3) ou un confinement dans une enceinte hermétique avec une diffusion par évaporation (patine n° 8).

Après la formation de la patine, une couche de cire est appliquée à sa surface pour arrêter la réaction chimique, la lustrer et la protéger. Le lustrage à la cire, suivant son intensité, permet de régler la clarté de la patine : sa matité ou sa brillance.

27. Guimilia-Mair 2002b ; Halleux 1981.

28. L'étude sur une gaine de lit datant de la fin du II^e s. ou du début du I^{er} s. a.C. et découverte dans la cargaison de l'épave de Mahdia a révélé la présence d'une patine noire au soufre à l'intérieur de la rainure et se prolongeant sous le fil d'argent. Néanmoins, une étude plus récente affirme que la patine noire serait plutôt une patine naturelle due au contexte anaérobie (Schwab *et al.* 2008, 19-20 ; Willer 1994).

25. Aucouturier & Danque-Ceretti 2012.

26. Descamps-Lequime 2006a, 82 ; Devogelaere 2018, 88-89.

Numéro	Solution	Application	Couleur	Identifiant Munsell
1	Sans patine	-	Voir fig. 6	-
2	Ammoniaque (NH ₄ OH) + chlorure d'ammonium (NH ₄ Cl)	Badigeonnage à froid au pinceau (3 jours)	Vert bleuâtre clair	5BG 6/8
3	Urine (carbonate d'ammoniaque ((NH ₄) ₂ CO ₃ •H ₂ O)) + chlorure de sodium (NaCl)	Badigeonnage à froid au pinceau ; bain ; badigeonnage à chaud au pinceau	Brun	10YR 5/3
4	Nitrate de cuivre (Cu(NO ₃) ₂)	Badigeonnage à chaud au pinceau	Vert très clair	5G 8/4
5	Soufre (S) + alun (KAl(SO ₄) ₂ •12 H ₂ O) + eau (H ₂ O)	Badigeonnage à chaud au pinceau	Noir	N 2/
6	Vinaigre de vin (C ₂ H ₄ O ₂ •H ₂ O) + chlorure de sodium (NaCl)	Badigeonnage à froid au pinceau (3 jours)	Brun jaunâtre	10YR 5/4
7	Sel de Barèges (K ₂ S) + eau (H ₂ O)	Badigeonnage à froid au pinceau	Brun rougeâtre foncé	5YR 3/2
8	Nitrate de cuivre (Cu(NO ₃) ₂) + ammoniaque (NH ₄ OH) + chlorure d'ammonium (NH ₄ Cl)	Badigeonnage à chaud au pinceau et vapeur dans une enceinte hermétique (24 heures)	Vert grisâtre foncé tacheté de bleu	2.5G 2/2
8 bis	Ammoniaque (NH ₄ OH) + chlorure d'ammonium (NH ₄ Cl)	Vapeur dans une enceinte hermétique (24 heures)	Bleu verdâtre foncé	7.5B 3/4
9	Acétate de cuivre (Cu ₂ (OAc) ₄)	Badigeonnage à chaud au pinceau	Rouge très sombre	10R 2/2
10	Acide acétique (C ₂ H ₄ O ₂) + sanguine (pigment rouge - hématite (Fe ₂ O ₃))	Badigeonnage à chaud au pinceau	Rouge	10R 5/6
11	Sans solution	Chauffage à la flamme et trempe	Gris bleuâtre foncé	5B 4/1

Fig. 9. Composition élémentaire, application et couleur des patines réalisées sur les plaquettes (© J. Devogelaere).

Résultats des expérimentations : analyse des couleurs

Notons d'abord que certaines expérimentations n'ont pas donné de patine, l'application d'une solution aqueuse d'alun notamment n'a provoqué aucune réaction chimique notable. Par ailleurs, suivant la qualité de la réalisation, une même patine pourrait réagir différemment avec la lumière et produire un résultat translucide ou au contraire totalement opaque.

Les couleurs obtenues couvrent un large spectre (fig. 10) : des nuances de vert et de bleu pour les patines réalisées avec des solutions à l'ammoniaque et au nitrate (patines n° 2, 4 et 8) ; rouge et rouge sombre pour celles avec de l'hématite et à l'acétate de cuivre (patines n° 9 et 10) ; plusieurs nuances de brun pour celles à l'urine, au vinaigre de vin et au sel de Barèges (patines n° 3, 6 et 7) ; noire pour la patine au soufre (patine n° 5).

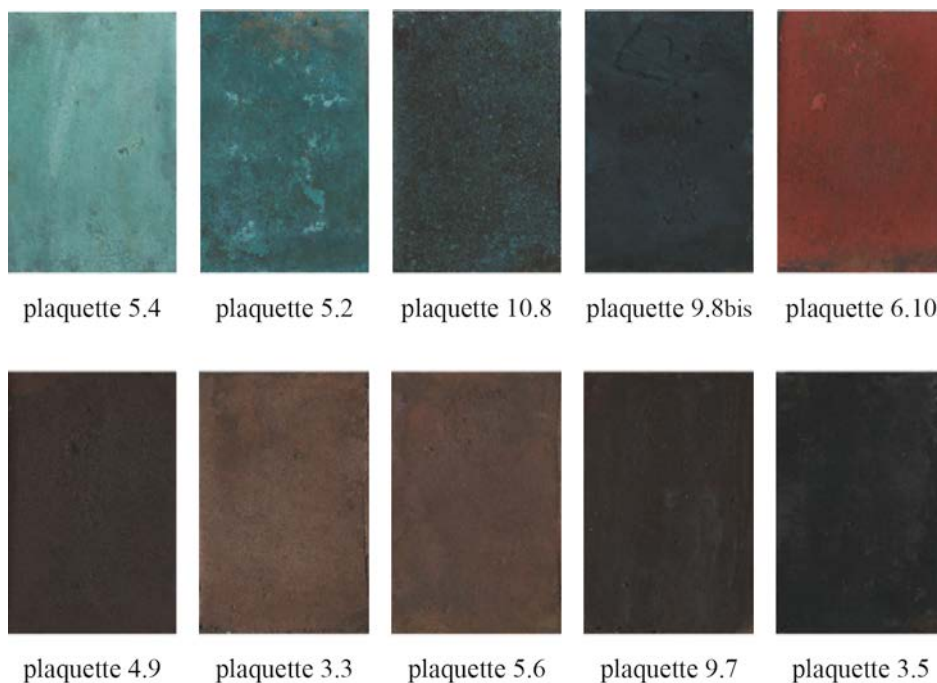


Fig. 10. Couleurs des patines (© J. Devogelaere).

Pour la patine à l'ammoniaque (patine n° 8), réalisée dans l'enceinte hermétique, deux numéros ont été attribués à l'échantillon : 8 pour la face avant et 8bis pour la face arrière. Cela s'explique par le fait que la face avant des plaquettes, qui avait été patinée dans un premier temps d'une solution de nitrate de cuivre, n'a pas donné une belle patine homogène, à l'inverse de la face arrière, qui s'est colorée d'une patine homogène bleu verdâtre foncé.

Trois patines ont été expérimentées sur le "bronze de Corinthe" (fig. 8) : une solution d'alun et de soufre qui donne une patine noire (plaquette 11.5), une autre à l'acétate de cuivre pour une patine rouge foncé (plaquette 11.9) et une dernière sans solution, mais uniquement par le chauffage à la flamme et la trempe, pour une coloration gris bleuâtre foncé (plaquette 11.11).

Cette dernière patine expérimentée résulte d'un passage de Pausanias : "[...] et on dit que le bronze de Corinthe, lorsqu'il est rougi par le feu, est trempé dans cette eau" (Paus. 2.3.3). Elle ne se forme qu'avec le "bronze de Corinthe" : en effet, aucune réaction chimique ne se produit sur un bronze binaire ou ternaire, ce qui laisse à penser que l'oxydation du cuivre en gris foncé, voire en noir, aux reflets bleutés, se produit grâce aux petites quantités d'or et/ou d'argent présents

dans l'alliage²⁹. Enfin, la trempe dans un bassin d'eau froide permet d'arrêter la réaction et de stabiliser la patine.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats issus des expérimentations permettent de se faire une idée claire de l'étendue particulièrement large du spectre de couleurs possibles des bronzes antiques : les alliages pouvaient aller du rouge clair au jaune doré en fonction de leur composition, et se parer d'un éventail de couleurs plus important encore grâce à la création de patines. De plus, des effets polychromes pouvaient être ajoutés par incrustation d'autres métaux ou par dorure pour accentuer certains détails.

Ce nuancier permet donc d'aller plus loin dans la connaissance et la compréhension des couleurs des bronzes antiques. Toutefois, il serait sans nul doute très utile de prolonger ce travail par de nouvelles recherches interdisciplinaires, liant des études de restauration et d'archéométrie et des expérimentations, qui pourraient permettre de compléter ce nuancier et d'approfondir l'étude des couleurs originelles des bronzes antiques, pouvant aller jusqu'à les restituer virtuellement dans le cas d'objets archéologiques bien définis.

29. Ces observations ont été récemment confirmées par des analyses physico-chimiques réalisées sur des objets archéologiques par le Centre de Recherche et de Restauration des musées de France (C2RMF) (Aucouturier *et al.* 2017, 121).

Bibliographie

- Aucouturier, M. et Danque-Ceretti, E. (2012) : *Dorure : décor et sublimation de la matière*, Paris.
- Aucouturier, M., Mathis, F. et Robcis, D. (2017) : "Les bronzes noirs antiques – nouvelles observations et mécanismes de création", *Technè*, 45, 115-123.
- Bertelli, P., Formigli, E., Marinelli, F., Morsani, B. et Pacini, A. (2013) : "Archeologia sperimentale", in : Formigli 2013a, 91-95.
- Bol, P. C. (1985) : *Antike Bronzetechnik: Kunst und Handwerk antiker Erzbildner*, Munich.
- Boleti, A. (2017) : *L'émeri. Modalités d'exploitation dans le monde égéen protohistorique et antique*, Paris.
- Brinkmann, V. (2015) : "Art of many colors. Classical statues in their original appearance", in : Settis et al. 2015, 95-100.
- Chantraine, P. (2009) : *Dictionnaire étymologique de la langue grecque. Histoire des mots*, Paris.
- Coluzza, C. et Formigli, E. (2013) : "Interazione luce-materia nei trattamenti superficiali dei bronzi antichi", in : Formigli 2013a, 61-69.
- Descamps-Lequime, S. (2006a) : "La polychromie des bronzes grecs et romains", in : Rouveret et al. 2006, 79-92.
- (2006b) : *L'encrier de Vaison-la-Romaine*, Paris.
- Devogelaere, J. (2018) : *Les couleurs du mobilier d'apparat en bronze dans le monde gréco-romain, du I^{er} siècle avant notre ère au I^{er} siècle de notre ère : de la caractérisation technique aux valeurs symboliques*, Aix-Marseille Université, Aix-en-Provence.
- Dordet, Y. (1990) : *La colorimétrie : principes et applications*, Paris.
- Duvauchelle, A., Krieg, M., Delbarre-Bärtschi, S. et Bielman Sanchez, A. (2013) : "Les lits en bronze d'Avenches : développement des aspects techniques et épigraphiques", *Bulletin de l'Association Pro Aventico*, 54, 7-118.
- Formigli, E., éd. (2013a) : *Colore e luce nella statuaria antica in bronzo*, Roma.
- (2013b) : "Il ruolo della luce nella statuaria antica in bronzo", in : Formigli 2013a, 72-76.
- Giulia-Mair, A., éd. (2002a) : *I Bronzi Antichi : Produzione e tecnologia, Atti del XV Congresso Internazionale sui Bronzi Antichi, 22-26 maggio 2001, Grado-Aquileia*, Montagnac.
- (2002b) : "Zosimos The Alchemist – Manuscript 6.29, Cambridge, Metallurgical interpretation", in : Giulia-Mair 2002a, 317-323.
- Giulia-Mair, A. et Craddock, P. T. (1993) : "Corinthium aes – Das schwarze Gold der Alchimisten", *Antje Welt – Zeitschrift für Archäologie und Kulturgeschichte*, 24, 1-62.
- Grand-Clément, A. (2011) : *La fabrique des couleurs : histoire du paysage sensible des Grecs anciens*, Paris.
- Halleux, R. (1981) : *Les alchimistes grecs – Papyrus de Leyde, papyrus de Stockholm et fragments de recettes*, Paris.
- Harding, A. (1999) : *Experiment and Design: Archaeological Studies in Honour of John Coles*, Oxford.
- Hellenkemper Salies, G., von Prittwitz und Gaffron, H. H. et Bauchhens, G., éd. (1994) : *Das Wrack : der antike Schiffsfund von Mahdia*, Köln.
- Mathis, F. (2005) : *Couches d'oxydation et patines intentionnelles des bronzes : Croissance et propriétés des couches d'oxydation et des patines à la surface d'alliages cuivreux d'intérêt archéologique ou artistique*, Université Paris-Sud, Paris.
- Mattusch, C. C. (2003) : "Corinthian Bronze. Famous, but elusive", *Corinth*, 20, 219-232.
- Oleari, C. (2008) : *Misurare il colore. Fisiologia della visione a colori, Fotometria – Colorimetria e norme internazionali*, Milan.
- Rama, J.-P. (1995) : *Le bronze d'art et ses techniques*, Dourdan.
- Reynolds, J. (1994) : "Experimental Archaeology: a Perspective for the Future", *The Reuvens Lecture, Stichting voor de Nederlandse Archeologie*, 5, 1-16.
- (1999) : "The nature of experiment in archaeology", in : Harding 1999, 156-162.
- Rouveret A., Dubel S. et Naas V., éd. (2006) : *Couleurs et matières dans l'Antiquité : textes, techniques et pratiques*, Paris.
- Schwab, R., Eggert, G., Pernicka, E. et Willer F. (2008) : "Zu den Bronzefunden aus dem Schiffswrack von Mahdia. Alte Proben, neue Untersuchungen", *Bonner Jahrbücher*, 208, 5-28.
- Settis, S., Anguissola, A. et Gasparotto, D., éd. (2015) : *Serial / Portable Classic - The Greek Canon and its Mutations*, Milan.
- Willer, F. (1994) : "Fragen zur intentionellen Schwarzpatina an den Mahdiabronzen", in : Hellenkemper Salies et al. 1994, 1023-1031.

