

Étude de la conservation des pièces de monnaie en bronze dans différents milieux archéologiques : le cas du site antique de Mlakou

دراسة حفظ قطع نقدية برونزية في بيئات دفن أثرية مختلفة: الموقع الأثري ملاكو-أنموذجاً -

ZIRAM Sakina^{1*}, BOUKHENOUF Arezki²

¹Université Alger 02 - sakina.ziram@univ-alger2.dz.

² Université Alger 02- arezki.boukhenouf@univ-alger2.dz.

Laboratoire LECMMA- U.Alger2

Date d'envoi : 02/11/2024

Date d'acceptation 17/12/2024

Date de publication :31/12/2024

Résumé

Le site archéologique de Mlakou dans la wilaya de Bejaia a livré des pièces de monnaie en bronze dans deux environnements distincts : un dépôt de marc d'olive et un sol. Parmi ces monnaies, quatre ont été étudiées. L'analyse du sol dans lequel deux pièces de monnaie ont été conservées, ainsi que celle de l'environnement des pièces préservées dans le marc d'olive, également entouré de sol, montre que le sol est aéré et assure un bon drainage. Les analyses comparatives de l'état de conservation de ces pièces révèlent que celles retrouvées dans le marc d'olive présentent un état de préservation meilleur à celles exhumées du sol. Cette différence est attribuée aux caractéristiques de drainage et de perméabilité du sol, et dans une moindre mesure, aux propriétés du marc d'olive.

Mots clés : Site archéologique Mlakou, conservation, bronze, corrosion, marc d'olive, sol.

Abstract:

The archaeological site of Mlakou in the Bejaia departement has yielded bronze coins in two distinct environments: an olive pomace deposit and in the soil. Among these, four coins were studied. The analysis of the soil where two of the coins were preserved, as well as the environment surrounding the coins preserved in olive pomace, which was also surrounded by soil, shows that the soil is well-aerated and ensures good drainage. Comparative analyses of the conservation state of these coins reveal that those found in the olive pomace display better preservation than those unearthed from the soil. This difference is attributed to the soil's drainage and permeability characteristics, and to a lesser extent, the properties of the olive pomace.

Keywords: Archaeological site of Mlakou, conservation, bronze, corrosion, olive pomace, soil.

* Auteur Correspondant.

1. Introduction

L'étude des métaux archéologiques, en particulier ceux en bronze, dans leur environnement d'enfouissement joue une grande importance pour leur conservation. Ces objets, qui véhiculent les informations du passé, sont soumis à des processus d'altération, influencés par les propriétés physico-chimiques des milieux qui les hébergent. La compréhension de ces interactions permet de développer des stratégies de préservation adéquates, essentielles pour la conservation du patrimoine archéologique.

Le site archéologique de Mlakou¹ offre une opportunité pour l'analyse de la corrosion et de la conservation des artefacts métalliques en raison de sa diversité environnementale. Les pièces de monnaie découvertes en 2023 sous une panse d'amphore dans ce site présentent des particularités de conservation intéressantes. Elles ont été retrouvées dans deux milieux distincts : un sol spécifique et un dépôt de marc d'olive. Ces environnements diffèrent notablement par leurs caractéristiques physico-chimiques, notamment leur capacité de rétention d'humidité, leur composition chimique, et, dans le cas du marc d'olive, la présence de composés organiques qui modifient les processus de corrosion.

Le marc d'olive, riche en résidus lipidiques, minéraux et composés phénoliques, est particulièrement reconnu pour ses propriétés antioxydantes et antimicrobiennes, qui ralentissent certains processus de corrosion². Cependant, en milieu humide, ce substrat peut également favoriser la formation d'oxydes, créant une patine protectrice qui stabilise les objets en bronze à long terme³. L'étude de ce phénomène est importante pour comprendre comment certains milieux organiques influencent la conservation des artefacts métalliques, en freinant les processus de dégradation.

Par ailleurs, le sol environnant exerce une influence déterminante sur la corrosion du bronze, principalement par sa capacité de rétention d'humidité, sa structure, et sa composition chimique⁴. Les sols présentant un faible drainage et une capacité d'échange cationique élevée, par exemple, interagissent activement avec les ions métalliques du bronze. Cette interaction réduit la migration des ions cuivre et étain vers le sol, contribuant à préserver la surface des objets et à renforcer leur résistance aux altérations sur de longues périodes.

Mise à part à ces propriétés physico-chimiques des milieux d'enfouissement, les facteurs comme le pH, la teneur en humidité et la composition ionique des sols jouent aussi un rôle capital dans la vitesse et la nature des processus de corrosion. À travers l'examen des effets distincts du marc d'olive et des sols environnants sur la corrosion du bronze, cette étude vise à approfondir la compréhension des mécanismes de dégradation et de préservation des métaux anciens. Les résultats permettront

¹ Boukhenouf, 2020, « Study of terracotta vaulting tubes from a new archaeological site in Mlakou, Algeria », *International Journal of Conservation Science*, 11 (1)p. 52

² Dermeche et al, 2013 « Olive mill wastes: Biochemical characterizations and valorization strategies ». *Process biochemistry*, 48(10), p. 1536

³ Benamar et al, 2015, « Chemical and mineralogical analysis of corrosion products on ancient bronze artifacts: Case study of Algerian archaeological pieces ». *Journal of archaeological science*, 3 p. 42

⁴ Khodja et al. 2018. « Soil characterization in the conservation of buried bronze artifacts: Physical and chemical influences ». *Conservation and management of archaeological sites*, , p. 224

également d'enrichir les approches en matière de conservation archéologique, contribuant ainsi à la préservation durable de notre héritage historique.

2. Recherches sur le site Mlakou

La recherche sur le site débute par une étude des conditions de formation de l'environnement dans lequel sont découvertes les pièces de monnaie, ainsi que du contexte de formation du dépôt de marc d'olive. Cette analyse initiale permet de contextualiser les conditions de conservation. Elle inclut également le prélèvement d'échantillons de sol en fonction de la formation géologique du terrain fouillé, afin de les caractériser.

a- Origine de sol et de marc d'olive

La formation du sol et du marc d'olive dans les contextes archéologiques constitue un maillon important pour comprendre les processus de conservation des artefacts. Le sol du site archéologique de Mlakou est, en partie, le résultat de la démolition des structures, potentiellement lors de la première occupation pendant la guerre de Firmus (370-375) ou de la seconde occupation. Chaque phase d'occupation contribue à la stratigraphie, ajoutant une couche à l'horizon agricole.

Par ailleurs, il est important de noter que le site a subi plusieurs dégradations après l'indépendance, ayant été labouré pendant environ une dizaine d'années. Cette exploitation et les perturbations successives ont influencé la stratigraphie.

Les pièces de monnaie entourées de marc résultent d'une cache monétaire dissimulée sous une amphore après la démolition du site au cours de la guerre de Firmus. L'amphore, brisée lors de cet événement, n'a laissé que sa base sous laquelle des pièces de monnaies ont été cachées. Suite à cette rupture, le liquide formé d'huile et de marc d'olive qu'elle contenait s'est écoulé sur les pièces. Après séchage, une couche de marc a ainsi enrobé chaque pièce.

b. Prélèvement des échantillons de sol

Avant d'analyser les échantillons de pièces de monnaie, au nombre de quatre, il est impératif de préciser le milieu dans lequel ces pièces ont été trouvées. À cet effet, nous avons prélevé des échantillons sur site à partir de trois couches stratigraphiques, le premier provient de la couche agricole, le second de la première strate c'est-à-dire de la deuxième occupation, et le dernier de la deuxième stratigraphie du site, qui correspond à la première occupation, marquée par la guerre de Firmus.

3- Résultats d'analyses de laboratoire

Les résultats obtenus incluent des analyses du sol portant sur sa composition chimique, son pH et son analyse granulométrique.

a. Composition chimique du sol

L'analyse chimique vise à déterminer des éléments chimiques présents dans les échantillons de sol. Cette analyse a été réalisée en utilisant un spectromètre de fluorescence X, de type Philips, modèle « Analytical ». Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau n°1.

Tableau n° 1 : Composition chimique du sol.

Source : Laboratoire de CETIM (GICA) à Boumerdes

Ech.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PF
% C1	41,23	10,31	5,08	19,10	1,27	0,01	1,60	0,41	0,35	0,59	20,05
% C ₂	34,70	8,64	4,78	25,47	1,27	0,01	1,33	0,42	0,23	0,48	22,66
% C ₃	46,26	11,27	5,59	15,67	1,27	0,01	1,78	0,43	0,30	0,64	16,84

L'étude des résultats d'analyses chimiques des échantillons montrent une présence élevée d'oxyde de silicium (SiO₂) à 41,23% et 46,26% pour les échantillons C1 et C3 et moins pour C2 de 34,70%, ces teneurs indiquent que les sols analysés sont riches en silice, caractéristique des sols argileux et des sédiments. L'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) est présent avec des teneurs 10,31%, 8,64% et 11,27% successivement pour C1, C2 et C3 souvent associé à des sols qui contiennent des argiles et des minéraux aluminosilicatés. La concentration d'oxyde de fer (Fe₂O₃) est de 5,08%, 4,78% et 5,59%. Sa présence contribue à la coloration du sol et peut influencer ses propriétés chimiques. Bien que relativement faible, cette concentration peut être significative pour le drainage et l'aération du sol. Enfin, nous remarquons des teneurs élevées en oxyde de calcium (CaO) à 19,10%, 25,47% pour C1 et C2 et 15,67% pour C3 peuvent indiquer que le sol est calcaire ou riche en calcaire, influençant le pH du sol. Un pH élevé favorise la création d'un milieu d'enfouissement meilleur pour la conservation des métaux.

b- Essai au pH des solutions aqueuses des mortiers

Pour effectuer cet essai, on procède avant tous à la préparation des solutions aqueuses des mortiers. Cette dernière consiste à submerger dans l'eau distillée et dans les conditions ambiantes les échantillons à l'état de motte, et une fois broyés pendant une durée de quinze jours jusqu'à la dissolution maximale des sels contenant les mortiers⁵.

La mesure du pH des solutions est effectuée au niveau du laboratoire de l'institut d'archéologie de l'université Alger2 à l'aide d'un pH-mètre de marque HANNA.

Les résultats obtenus sont inscrits dans les tableaux n°2.

Tableau n° 2 : Résultats du pH.

Échantillons	C1	C2	C3
pH	9,40	8,01	8,77

⁵ Boukhenouf et al, 2007, P.209.

Les échantillons présentant un pH supérieurs à 8 indiquent une présence notable d'éléments alcalins, essentiellement l'oxyde de calcium, issu de la décomposition du carbonate de chaux. Cet élément crée un environnement alcalin favorable à la conservation des objets en bronze, en limitant les processus de corrosion.

c- Analyse granulométrique

Les analyses granulométriques, effectuées par tamisage conformément à la norme NF EN 933-1, ont permis de déterminer la répartition granulométrique des particules des échantillons analysés, C1, C2 et C3. Le diamètre des tamis est représenté en abscisses, tandis que le pourcentage cumulé passant est en ordonnée pour des raisons pratiques, nous avons utilisé une extrapolation logarithmique des valeurs du diamètre. Les résultats obtenus sont présentés dans le graphe n°1.

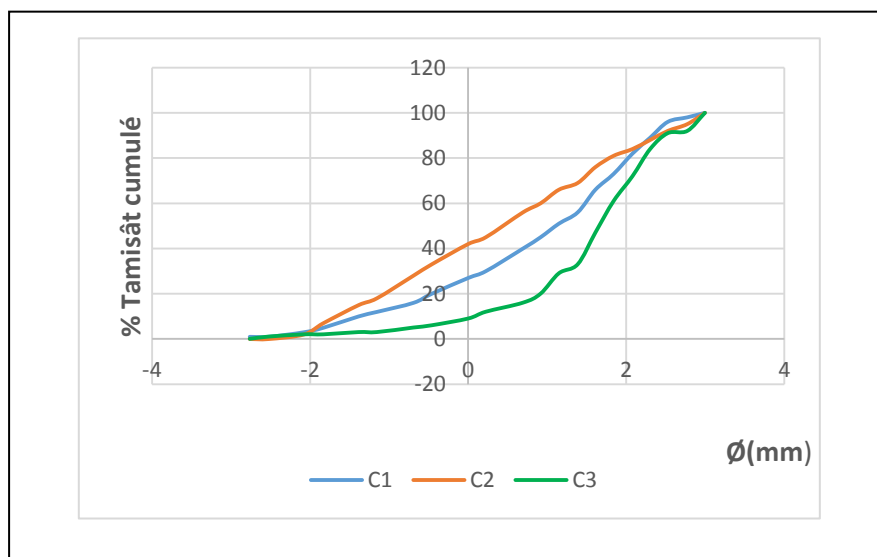


Figure n° 1 : Graphe de répartition granulométrique.

Source : Professeur Arezki Boukhenouf

À travers cette analyse granulométrique, nous pouvons observer la répartition des différents composants du sol, tel que le gravier, le sable, le limon et l'argile. Elle permet aussi de déterminer les proportions relatives de ces éléments dans chaque échantillon, permettant de mieux comprendre leur potentiel d'usage dans le contexte recherché. La lecture qu'on donne au graphe est la suivante :

- Gravier

Pour les échantillons C1 et C2, la courbe granulométrique indique qu'environ 40 % des particules sont de taille supérieure à 2mm. Cela signifie que ces échantillons contiennent 40 % de gravier.

En revanche, l'échantillon C3 présente une proportion de gravier plus élevée, atteignant 56 %. Cela indique une plus grande présence de particules grossières dans

cet échantillon, ce qui peut affecter les propriétés mécaniques du sol, telles que la résistance et la perméabilité.

- Sable

Pour les échantillons C1 et C₃, la courbe granulométrique montre que la proportion de sable augmente de 1 % à 30 % pour des tailles de particules comprises entre 0,063 mm et 2 mm, indiquant que ces échantillons contiennent 40 % de sable.

L'échantillon C3, cependant, affiche également une proportion de 56 % de sable, suggérant une texture plus fine et une composition plus variée. Cette augmentation du sable dans C3 par rapport à C1 et C2 peut contribuer à un meilleur drainage et à une aération accrue du sol.

- Limon et Argile

Les résultats montrent que les proportions de limon et d'argile sont très faibles, à seulement 0,4 %. Cela signifie que les échantillons analysés sont principalement constitués de gravier et de sable, avec peu de particules fines.

La faible teneur en limon et en argile suggère un sol peu propice à la rétention d'eau. Ce type de sol est favorable à la conservation des pièces de monnaie *in situ*, car il facilite un bon drainage, limitant ainsi l'humidité excessive, qui pourrait accélérer la corrosion.

4. Altérations présentées sur les pièces de monnaie

Comme les pièces de monnaie, P23M11, P23M29 et P23M83, ont été retrouvées dans des environnements variés, les faces et revers sont en grande partie dissimulés, soit par des dépôts de terre, soit par une couche de marc d'olive adhérente. Ces dépôts et altérations compliquent la lecture des inscriptions et des motifs. Nous nous sommes arrêtés au stade où les altérations autres que ces dépôts étaient bien visibles, avant d'effectuer le nettoyage final des pièces. Pour pallier ces difficultés, nous avons adopté un processus de nettoyage en deux étapes. Tout d'abord, un nettoyage à sec a permis de retirer les résidus les plus friables. Ensuite, un lavage à l'eau distillée a été réalisé pour éliminer les particules plus tenaces. Les résultats obtenus, ainsi que l'état de conservation des altérations, sont présentés dans la planche ci-jointe.

Milieu d'enfouissement : Sol		Milieu d'enfouissement : Marc d'olive	
			
			
P23M11	P23M29	P23M11	P23M183

Planche : Montre l'état des différentes pièces de monnaie
Source : Équipes de fouille de Mlakou

Le conteneur d'enfouissement joue un rôle important dans la conservation des pièces de monnaie en bronze du site archéologique de Mlakou. À travers l'analyse visuelle des échantillons, nous constatons que les pièces P23M11 et P23M29 présentent diverses altérations, probablement dues aux réactions entre les éléments présents dans le sol et les composants des pièces.

Ces altérations se manifestent par des tâches de couleurs variées: La couleur verte souvent causées par la formation de malachite, $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$, ou de chlorure de cuivre (paratacamite), $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$, la rouge est dû à la présence de cuprite, Cu_2O , ainsi que des dépôts de teinte crème qui sont dus probablement à des dépôts calcaires du sol et la noire qui correspond à la ténorite, CuO , formée dans des conditions de corrosion avancée, résultant de processus chimiques entre le bronze et le milieu environnant.

En revanche, le milieu d'enfouissement riche en marc d'olive présente moins d'altérations, montrant seulement quelques points de corrosion.

5. Analyse des résultats obtenus

Les pièces de monnaie en bronze retrouvées sur le site archéologique de Mlakou, dans une zone orientée vers le ravin du côté de l'Oued Soummam, mettent en évidence l'influence des facteurs géographiques et géologiques sur la conservation des artefacts. La pente prononcée et la perméabilité du sol favorisent un drainage naturel, limitant ainsi l'accumulation d'humidité autour des pièces. Ce drainage efficace empêche la stagnation de l'eau, une condition propice au développement de la corrosion. En l'absence de stagnation, les pièces de monnaie échappent aux effets

néfastes d'une humidité prolongée, souvent chargée en minéraux corrosifs, et évitent ainsi la formation de couches de corrosion active.

La perméabilité du sol constitue un autre avantage pour la préservation des artefacts. Contrairement aux sols plus denses, qui retiennent l'eau et favorisent une humidité persistante, un sol perméable comme celui de Mlakou permet une aération naturelle. Cette aération empêche la stagnation de l'humidité autour des artefacts enfouis, réduisant les cycles de mouillage et de séchage qui engendrent des variations de contraction et d'expansion des couches de corrosion. Grâce à cela, les pièces de monnaie en bronze conservent mieux leur intégrité structurelle et subissent moins de stress mécanique causé par les fluctuations environnementales.

Le type de sol environnant, qu'il soit minéral ou organique, joue également un rôle important dans la conservation des pièces en bronze. Les analyses montrent des effets contrastés selon le type de milieu :

a. Sol :

Bien que relativement humide, le sol du site n'entraîne pas de corrosion excessive, principalement grâce à la présence d'oxydes de silice et de calcium, dérivés de la décomposition de mortiers à base de chaux, ce qui leur confère des caractéristiques propices au drainage et à la perméabilité. Ces oxydes agissent comme un tampon chimique, réduisant l'acidité du sol et ralentissant ainsi la dégradation du bronze. Cette particularité permet une conservation relative des artefacts, malgré les propriétés corrosives potentielles du sol.

b. Formation du marc d'olive :

Ce milieu organique, riche en composés phénoliques, présente des propriétés antioxydantes qui inhibent les processus de corrosion. La présence de ces composés contribue à neutraliser certaines réactions oxydatives, offrant ainsi une protection accrue aux pièces en bronze. Les artefacts récupérés dans ce milieu montrent des signes de corrosion bien moins profonds que ceux enfouis dans le sol du site.

Ces observations démontrent combien les caractéristiques de l'environnement d'enfouissement influent sur la préservation des métaux archéologiques, soulignant l'importance de stratégies de conservation adaptées aux conditions propres à chaque site.

c. Effet de la pente sur le drainage et la conservation

Le lieu de découverte des pièces de monnaie bénéficie naturellement d'un drainage. La gravité favorise l'écoulement de l'eau vers la pente du ravin qui donne sur l'Oued Soummam, réduisant ainsi les risques d'accumulation d'humidité autour des pièces de monnaie. Ce drainage contribue à limiter les conditions favorables à la corrosion, car l'eau stagnante, en particulier si elle est enrichie en minéraux corrosifs, est l'un des principaux facteurs de dégradation des métaux en contexte archéologique. Les pièces ne restent donc pas exposées à des niveaux d'humidité constants, un élément essentiel pour éviter la formation de couches de corrosion active.

Ajoutant à ce constat, la perméabilité du sol joue également un rôle déterminant dans la préservation des pièces. Un sol perméable permet un drainage rapide de l'eau, réduisant ainsi le temps de contact entre l'eau et les artefacts métalliques enfouis. Contrairement aux sols argileux, connus pour retenir l'eau et créer un environnement humide favorable à la corrosion par piqûres, les sols perméables favorisent l'aération et empêchent la formation d'une couche d'eau stagnante autour des artefacts.

De plus, les variations de température et d'humidité au sein d'un sol perméable sont mieux régulées, ce qui limite les cycles d'expansion et de contraction des couches de corrosion. Par conséquent, les pièces de monnaie subissent moins de stress mécanique dû à des changements environnementaux fréquents, contribuant ainsi à leur intégrité structurelle.

6. Conclusion

L'analyse des résultats granulométriques montre que les échantillons étudiés sont dominés par des particules de graviers et de sable, ce qui leur confère des caractéristiques favorables au drainage et à la perméabilité. Les très faibles pourcentages de limon et d'argile indiquent une faible capacité de rétention d'eau, ce qui favorise la conservation des pièces de monnaie. Cet état est confirmé par la composition chimique du sol, qui présente des teneurs élevées en silice et en oxyde de calcium. La présence de ce dernier, avec sa concentration élevée, offre également un meilleur milieu de conservation. Ajoutant à cette perméabilité, la pente a favorisé aussi le drainage. L'avantage de ce milieu permet au marc d'olive d'être un environnement de conservation particulièrement efficace pour les pièces de monnaie en bronze, ralentissant la corrosion grâce à des composés naturels qui inhibent l'oxydation.

7. Bibliographie

Articles de revue

- Benamar, I., Dendougui, H., & Moulay, S. (2015). « Chemical and mineralogical analysis of corrosion products on ancient bronze artifacts: Case study of Algerian archaeological pieces ». *Journal of archaeological science*, 3, 40-49.
- Boukhenouf Arezki, Hamiane Messaoud, Saidi Mohamed (2007). « Approche d'étude et caractérisation des mortiers archéologiques, le cas des sites historiques ». *Revue d'études archéologiques*, 1, 206-213.
- Boukhenouf A., 2020, « Study of terracotta vaulting tubes from a new archaeological site in Mlakou, Algeria », *International Journal of Conservation Science*, 11 (1), 51-60

- Dermeche, S., Nadour, M., Larroche, C., Moulti-Mati, F., & Michaud, P. (2013). « Olive mill wastes: Biochemical characterizations and valorization strategies». *Process biochemistry*, 48(10), 1232-1252.
- Khodja, W., Bellal, R., & Belarbi, A. (2018). « Soil characterization in the conservation of buried bronze artifacts: Physical and chemical influences ». *Conservation and management of archaeological sites*, 20(3), 222-233.