

APPORT ET INTÉRÊT DES NOUVELLES TECHNOLOGIES À LA CONSERVATION-RESTAURATION DE DEUX ARTEFACTS ARCHÉOLOGIQUES (JAMBIÈRES EN ALLIAGE CUIVREUX ET *CARDIOPHYLAX* EN MATÉRIAUX COMPOSITES)

FRANÇOISE MIELCAREK, SÉBASTIEN BRZUCHACZ

Résumé L'apport et l'emploi des nouvelles technologies combinées aux techniques classiques de restauration offrent de nouvelles perspectives, tant sur le plan technique que sur le plan de la recherche. Elles permettent de développer de nouvelles approches et facilitent la diffusion des données, des échanges auprès des professionnels du patrimoine et du grand public. Cet article permet d'illustrer concrètement l'apport et l'emploi des nouvelles technologies combinées aux techniques classiques de restauration sur deux objets phares métalliques et composites provenant du musée d'Aléria. En accord avec l'ancien conservateur en chef du musée départemental d'Archéologie d'Aléria, une démarche scientifique a été mise en place associant plusieurs professionnels scientifiques (conservateurs, conservateurs-restaurateurs, ingénieurs, etc.).

L'article porte sur une étude scientifique menée sur deux objets métalliques à la demande de M. Jean-Claude Ottaviani, conservateur en chef du musée départemental d'Archéologie d'Aléria. Il s'agit d'une paire de jambières en alliage cuivreux et d'un *cardiophylax* en matériaux composites. Ils proviennent de la nécropole-pré-romaine d'Aléria. Les fouilles ont été réalisées dans les années 1964 par M. J. Jehasse. Au moment de leur prise en charge par le LC2R, le décor « incisé » et les matériaux organiques n'étaient pas perceptibles.

Le but de cet article est de montrer que les techniques employées en conservation-restauration nécessitent l'apport de compétences scientifiques diverses qui vont permettre de rendre accessibles des informations pas ou peu visibles et de les préserver pour des études ultérieures.

La première partie va porter sur une paire de jambières et la seconde sur un *cardiophylax*.

La paire de jambières

Le constat d'état sous loupe binoculaire a permis de mettre en évidence un certain nombre d'éléments (**fig. 1 et 2**). Elles sont incomplètes, déformées et très fragiles à manipuler. Elles présentent de nombreuses micro-fissures, craquelures et lacunes.

La surface d'origine a disparu en de nombreux endroits. On observe également de nombreux collages et comblements anciens et des traces anciennes de meulage et de rayures indéterminées. Elles présentent une couverture noire huileuse indéterminée sur toute la surface.

Suite à ce constat d'état, un certain nombre d'interventions sont réalisées. La figure 3 présente une liste chronologique des interventions menées avec l'accord du conservateur en chef du musée d'Aléria.



Figure 1 Paire de jambières avant restauration.
© LC2R Draguignan.



Figure 2 Vue de face d'une jambière avant restauration. © LC2R Draguignan.

Interventions	Opérateurs
1- Photographies avant, pendant et après restauration	LC2R
2- Radiographies avant restauration	Centre Imagerie médicale de Draguignan
3- Constat d'état → Protocole d'intervention → BPL	
4- Sondages sous loupe binoculaire	LC2R
5- Suppression de la couche huileuse noire	
6- Dégagement mécanique sous loupe binoculaire	
7- Analyses par micro-spectroscopie de fluorescence X (mXRF)	CEREGE
8- Dessin archéologique	EPHE

Figure 3 Liste chronologique des interventions.

Le principal objectif était d'améliorer la lisibilité du décor « incisé » mis en évidence au cours du dégagement mécanique afin de permettre son étude et sa présentation muséographique. Au cours du dégagement mécanique sous loupe binoculaire, des traits sont apparus, difficiles à observer car recouverts de produits de corrosion du cuivre épais. La poursuite du dégagement s'est ensuite effectuée millimètre par millimètre à l'aide de meulettes en acier et différents personnages sont révélés (fig. 4 et 5). La profondeur du décor incisé est de l'ordre de 100 µm.



Figure 4 Aperçu d'Héphaïstos, jambière droite.
© LC2R Draguignan.

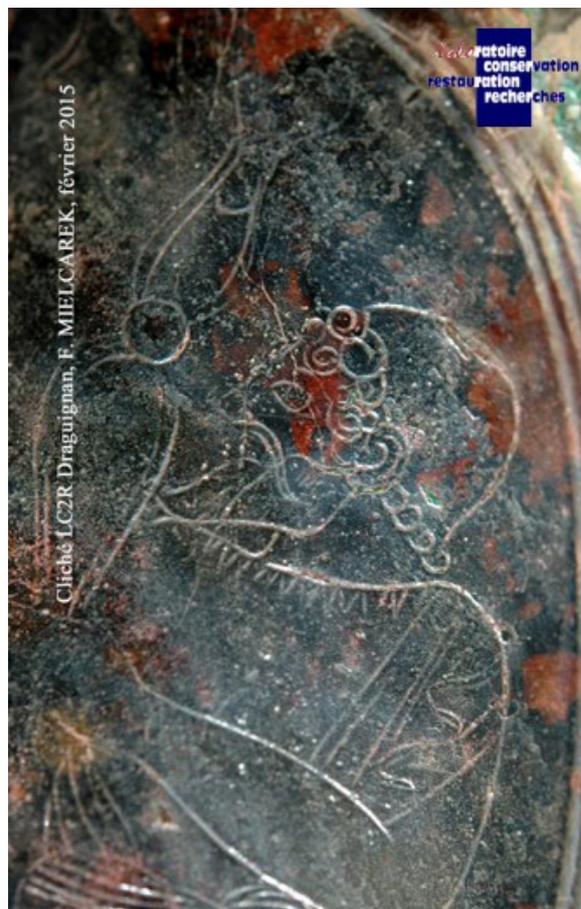
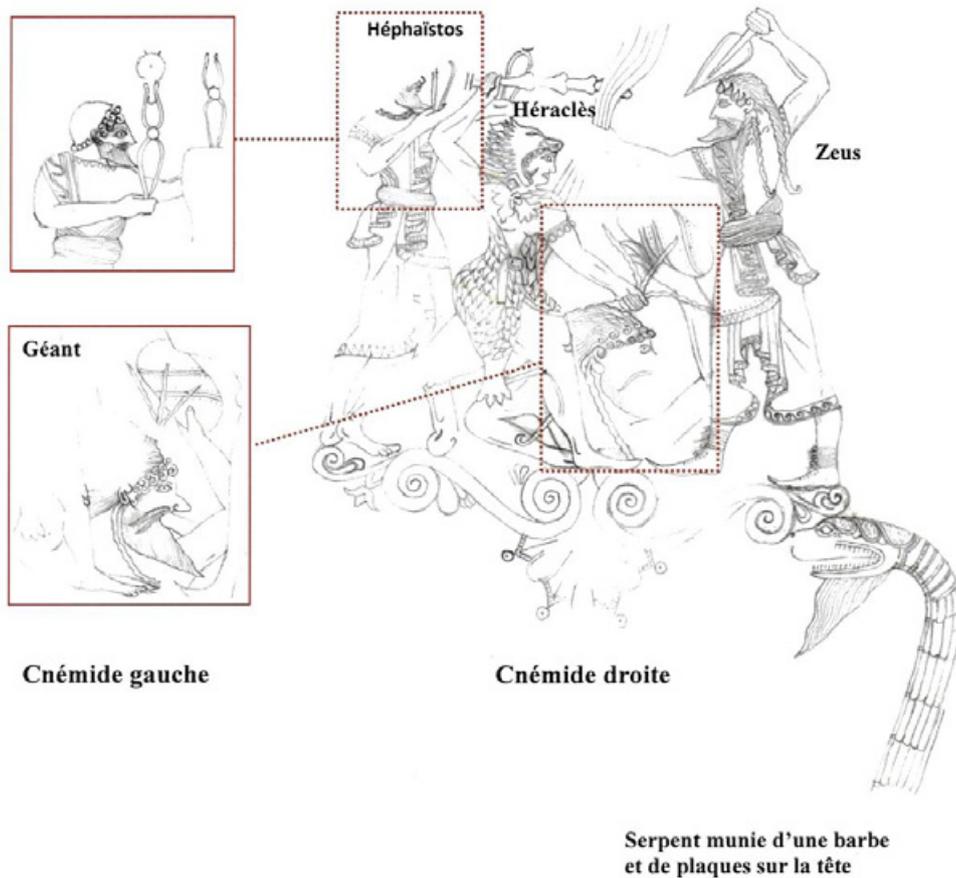


Figure 5 Aperçu détaillé d'Héphaïstos, jambière gauche. © LC2R Draguignan.

Suite à cette découverte, M. Stéphane Verger, directeur d'études à l'École pratique des hautes études, a reproduit à l'échelle les scènes mythologiques (fig. 6) révélées par le dégagement mécanique. Selon ses explications, il s'agit d'une gigantomachie, le combat des géants contre les dieux de l'Olympe. La composition et la construction de la scène se révèlent très complexes. Malgré la précision de ce dessin, des zones restent inaccessibles. Pour essayer de récupérer les détails endommagés du décor, des techniques physiques complémentaires (fig. 7) sont mises en place après discussion avec le conservateur en chef du musée d'Aléria. Elles devaient permettre d'améliorer à la fois son étude et sa présentation au public.



Dessin 1 : scène mythologique, dessin reproduit par M. Stéphane VERGER

Figure 6 Scènes mythologiques représentant une gigantomachie.

Interventions	Opérateurs
9- Radiographies et scanner après restauration	Polyclinique de Draguignan
10- Numérisation 3D après restauration	Digiscan 3D
11- Couverture photographique après restauration	Studio Guichard
12- Animation virtuelle	Perazio Engineering
13- Contacts	CEA de Cadarache
14- Tomographie	CETIM
15- Publication	LC2R + partenaires
16- Présentation muséographique	Musée départemental d'Archéologie d'Aléria

Figure 7 Liste chronologique des interventions (suite).

Une nouvelle tentative de radiographies et de scanner est réalisée. Elle n'a pas donné de résultats probants dus au manque de sensibilité de ces méthodes, principalement dédiées au domaine médical. Une numérisation des jambières est alors tentée. Cependant, la surface lisse et l'extrême finesse du décor n'ont pas permis d'obtenir le résultat escompté.

La décision est prise de faire appel à un photographe professionnel dit « de l'extrême », car ce dernier a réalisé la couverture photographique des grottes de Lascaux et Chauvet et, avec son équipe, il a mis au point une technique de colorisation 3D qui permet d'obtenir une image nette en tout point. « Il ne s'agit plus de photographie mais plutôt d'imagerie » selon ses propres termes. Cette équipe a ensuite réalisé une animation dont voici deux prises de vue (**fig. 8 et 9**).



Figures 8 et 9 Traitement 3D par la société Perazio Engineering, imagerie numérique HD et tracé superposé sur les micro-gravures par le Studio Guichard.

Un tracé superposé permet de mieux appréhender le décor incisé et sa disposition sur une jambière. Ce résultat, malgré son intérêt, ne permettait pas de mettre en évidence les détails manquants des décors dans les zones endommagées par la corrosion.

En accord avec le conservateur du musée d'Aléria, le CEA de Cadarache a été contacté, il nous a mis en contact avec le CETIM pour une analyse plus adaptée à nos besoins. Cette structure a accepté d'intervenir gracieusement et d'insérer ces jambières dans une étude de faisabilité avec mise à disposition du tomographe.

Contrôle par tomographie X

Principe

La tomographie est une technique d'imagerie développée initialement pour le domaine médical, dont le système d'acquisition est mieux connu sous le nom de scanner à rayons X. Cette technique est basée sur l'inversion des mesures d'une grandeur physique caractéristique d'un milieu à l'aide d'algorithmes mathématiques. Dans le cas de la tomographie X, la grandeur physique mesurée correspond au coefficient d'atténuation des rayons X en transmission de l'objet scanné. La tomographie permet ainsi de reconstruire des coupes transverses d'un objet à partir de ses radiographies. Dans les tomographes industriels, ces radiographies sont prises selon différents angles de vues, perpendiculairement aux coupes reconstruites, sur 360°. Il est ensuite possible de reconstruire l'objet en 3D à partir des coupes 2D, grâce à des techniques de traitement d'image appliquées en post-acquisition, et d'accéder ainsi à tout le volume de l'objet inspecté.

Description

Le micro-tomographe industriel se distingue du scanner médical par son tube à rayons X et son détecteur plan à 2 dimensions. Ce tube à rayons X est plus énergétique et beaucoup plus résolu, ce qui permet de traverser des matériaux plus denses que le corps humain et d'atteindre des résolutions inférieures à 100 µm. Le détecteur se présente sous la forme d'un écran plat doté d'un million de pixels de 200 µm et permet d'atteindre une résolution d'image identique dans les trois directions de l'espace. La figure 10 regroupe les caractéristiques techniques du tomographe.

Marque	Tomographe Yxlon Y.CT Modular
Tube X	Fein Focus FXE-225.48 directionnel à micro-foyer variable 225 kV / 320 W
Détecteur	Détecteur plan 2D Perkin Elmer XRD 0822-16 HDR Premium 16bit 200 µm, 1024 × 1024 éléments
Bâti	Marbre en granit de 3770 mm x 976 mm x 2463 mm, monté sur 4 isolateurs pneumatiques à membrane BiAir de Bilz
Mécanique	8 axes motorisés, répétabilité < 10 µm
Algorithme de reconstruction	Rétroprojection filtrée adaptée à la géométrie conique (Feldkamp)
Encodage images	Entier non signé sur 16 bits

Figure 10 Caractéristiques techniques.

Sur la **figure 11**, vous découvrez le tomographe enfermé dans une cabine de radioprotection. Vous avez à droite les 2 tubes à rayons X montés l'un sur l'autre, au centre l'objet positionné sur un plateau motorisé qui tourne à 360° et à gauche de l'image se trouve le détecteur numérique.



Figure 11 Tomographe du CETIM. © CETIM.

Processus

Le processus de mesure en tomographie se décompose en trois grandes phases : l'acquisition, la reconstruction et l'exploitation.

La phase d'acquisition consiste à positionner l'objet à scanner sur le plateau tournant situé entre le tube à rayons X et le détecteur, puis à prendre environ 1500 radiographies numériques de l'objet sur 360° (nombre variable qui dépend des dimensions du détecteur et de l'objet scanné) grâce au mouvement de rotation du plateau. Si l'objet est plus grand que le détecteur, il est possible d'enchaîner les scans successifs en hauteur afin de couvrir entièrement l'objet, le système se chargeant de gérer les zones de recouvrement entre les différents scans réalisés. La principale difficulté de cette étape a consisté à maintenir fixe chaque jambière sur le plateau tournant.

La phase de reconstruction consiste à inverser l'ensemble des radiographies réalisées sur 360° grâce à un algorithme mathématiques appelé « rétroprojection filtrée », adapté à la géométrie conique (également connu sous le nom d'algorithme de Feldkamp). Cette phase requiert l'utilisation d'un ordinateur spécifique dans lequel l'algorithme est implémenté, car les temps de calcul et la quantité de données traitées peuvent être très importants. Les paramètres de contrôle mis en œuvre pour le scan des jambières sont synthétisés dans la **figure 12**.

À la fin du processus, l'équipement fournit un empilement de coupes 2D décrivant l'objet et son contenu. Il est alors nécessaire d'utiliser un logiciel de traitement d'images 3D pour visualiser les coupes, obtenir une représentation 3D de l'objet et éventuellement réaliser des traitements plus spécifiques. C'est la phase d'exploitation des données qui permet d'extraire du scan les informations initialement recherchées. Le scan se traite comme un volume décrit par un pixel 3D que l'on appelle voxel.

Tension	160 kV
Intensité	0,32 mA
Taille du foyer / Filtrage du faisceau X	26 μm / 0,5 mm de cuivre
Dimensions actives du détecteur	2032 x 1024 pixels + 3 positions verticales
Temps d'intégration	1 x 950 ms
Nombre de projections	2070
Distance source – détecteur	800 mm
Grossissement	3,28
Résolution d'image en X / Y / Z	58,62948 μm en XY et 60,64234 μm en Z
Dimensions du volume reconstruit X / Y / Z	2048 x 2048 x 3072 voxels

Figure 12 Paramètres de contrôle.

Dans le cas des jambières, l'objectif principal de l'exploitation des données était d'obtenir une représentation 3D des gravures et de réaliser une mise à plat des jambières afin d'en fournir une représentation plus facile à lire et interpréter. Ces opérations nécessitent de déterminer les contours de l'objet scanné en se basant sur la valeur des niveaux de gris de l'image (seuillage adaptatif). La représentation 3D que l'on obtient permet déjà d'examiner en détail les gravures.

Pour la mise à plat du volume, il est nécessaire de définir une forme libre à partir de la surface gravée. Le succès de l'opération dépend fortement de la qualité des contours préalablement déterminés.

Résultats

Les images reconstruites par tomographie ne contiennent pas beaucoup d'artéfacts en raison de la forme relativement simple des jambières et de la faible épaisseur de cuivre à traverser pour les scanner. En revanche, l'examen des gravures a montré que la résolution d'image atteinte n'était pas suffisante pour rendre compte de toutes les gravures, en particulier les moins marquées, ainsi que de l'épaisseur résiduelle des jambières par endroits. Ce manque de résolution se traduit localement par des épaisseurs de quelques voxels sur lesquelles la détermination des contours est moins précise. Les conséquences sur le volume mis à plat sont l'apparition de zones floues ou de zones noires donnant l'impression d'informations manquantes.

Le seul moyen d'augmenter la résolution d'image serait d'avoir recours à un détecteur plus grand ou plus résolu. Une des contraintes de la tomographie à rayons X réside dans la nécessité de conserver toute la largeur de l'objet scanné dans le champ de vue du détecteur pendant l'acquisition. La résolution d'image maximale que l'on peut obtenir dépend en fait du diamètre maximal de l'objet scanné ainsi que du nombre de pixels du détecteur (en supposant que ce dernier soit plus large que l'objet). Avec les nouveaux détecteurs, il serait possible d'atteindre une résolution d'image comprise entre 30 et 35 μm .

Les résultats sont cependant assez probants, ils permettent de visualiser certaines zones endommagées par la corrosion et d'acquiescer une meilleure visibilité des détails conservés.

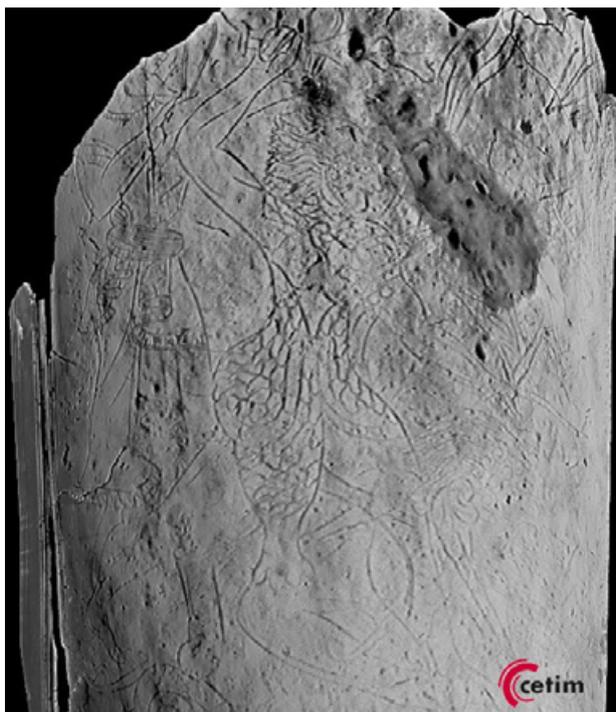


Figure 13 Exemple de résultats obtenus grâce au tomographe. © CETIM.

En outre, ces clichés confirment en certains endroits la perte totale d'informations (**fig. 13**). Toutes ces données vont nous permettre de comparer le dessin, le décor incisé et les clichés tomographiques afin d'affiner la compréhension des scènes mythologiques.

Grâce à des logiciels spécifiques, un travail de remise à plat (**fig. 14**) d'une des deux jambières scannées est effectué. Ce travail a rencontré de nombreux problèmes liés à la faible épaisseur des jambières et à l'importante dégradation de la surface. Il mériterait d'être poursuivi et finalisé. Les zones en gris foncé ou noir correspondent à des faibles épaisseurs au niveau desquelles la détection de contour n'a pas fonctionné correctement. À terme, il devrait permettre une lecture en 2D des décors et par la suite (pourquoi pas?) un repositionnement de ces derniers sur des jambières numérisées à des fins de présentation muséographique.

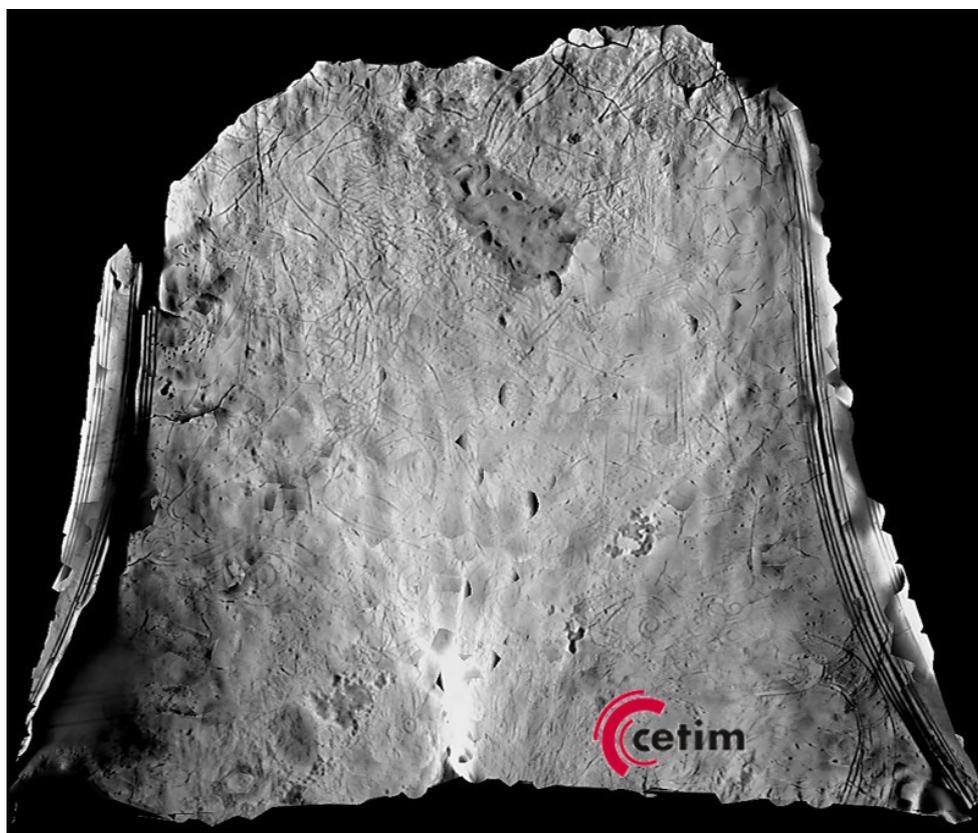


Figure 14 Tentative de mise à plat d'une des deux jambières scannées. © CETIM.

Le *Cardiophylax*

Le *cardiophylax* (fig. 15) est une cuirasse composée de deux disques convexes en alliage cuivreux doublés de fer, réunis par une longue plaque en fer articulée par un système de charnières en fer et en alliage cuivreux.



Figure 15 *Cardiophylax* avant restauration. © LC2R Draguignan.

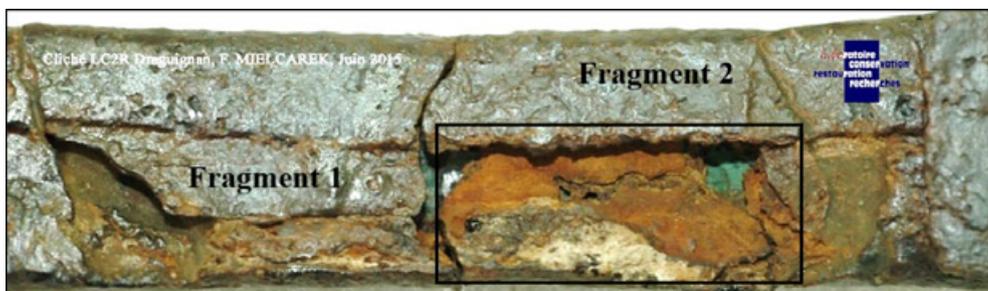


Figure 16 Élément de *cardiophylax* en cours de dégagement mécanique.
© LC2R Draguignan.

Après dégagement mécanique de la longue plaque en fer (fig. 16), plusieurs éléments sont révélés :

- du bois minéralisé au niveau des deux disques convexes;
- des matériaux organiques minéralisés à l'intérieur des longues plaques en fer. Il s'agit de fourrure et peut-être de textile (fig. 17 et 18). Des analyses sont prévues pour confirmer ou infirmer ces observations macroscopiques;
- un décor géométrique (?) sur l'avant, très endommagé.



Figure 17 Mise en évidence de traces de textile (à confirmer par des analyses).
© LC2R Draguignan.



Figure 18 Mise en évidence de traces de fourrure (à confirmer par des analyses).
© LC2R Draguignan.

Suite à cette découverte, deux propositions sont présentées au conservateur en chef du musée d'Aléria. La première proposition consistait à repositionner les deux fragments de manière classique par collage et consolidation, mais cela entraînait un risque de contaminer les matériaux organiques et de ne plus pouvoir y accéder pour des études ultérieures.

La seconde proposition suggérait de créer un support translucide par numérisation des deux fragments avec un laser Tracker Leica et son T-Scan (fig. 19) et de réaliser son impression 3D.

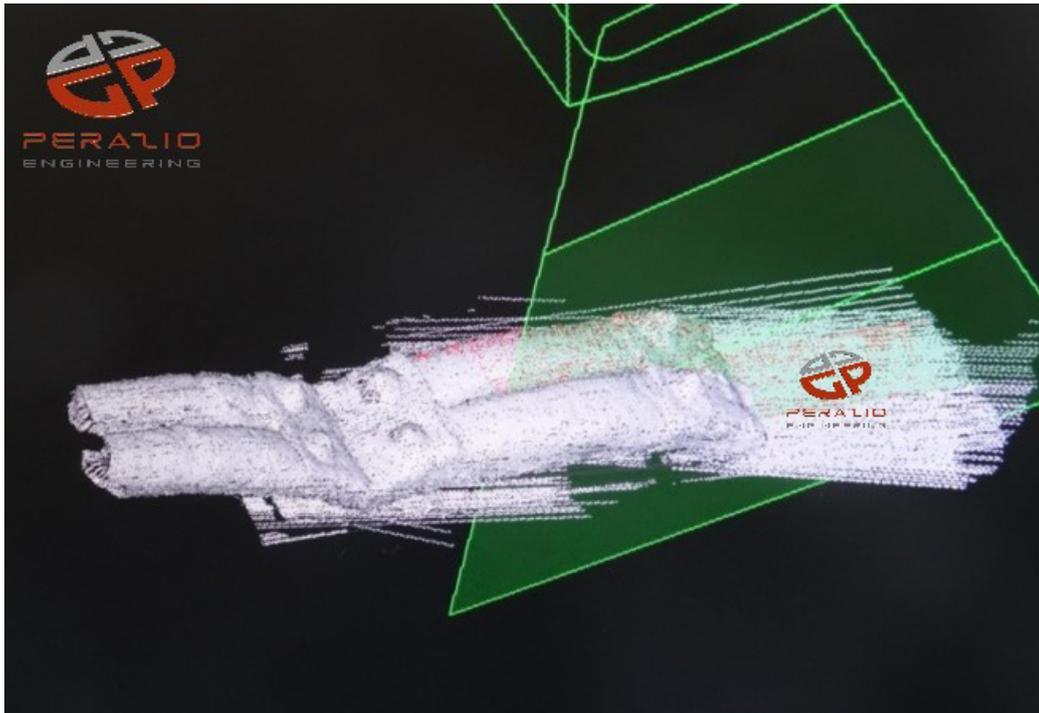


Figure 19 Numérisation des 2 fragments avec un laser Tracker Leica.
© Perazio Engineering.

Le support ou gaine est conçu virtuellement (**fig. 20**) pour donner une épaisseur à cette « peau » numérisée afin d’obtenir un juste équilibre entre souplesse (pour la charnière) et rigidité (pour le maintien).

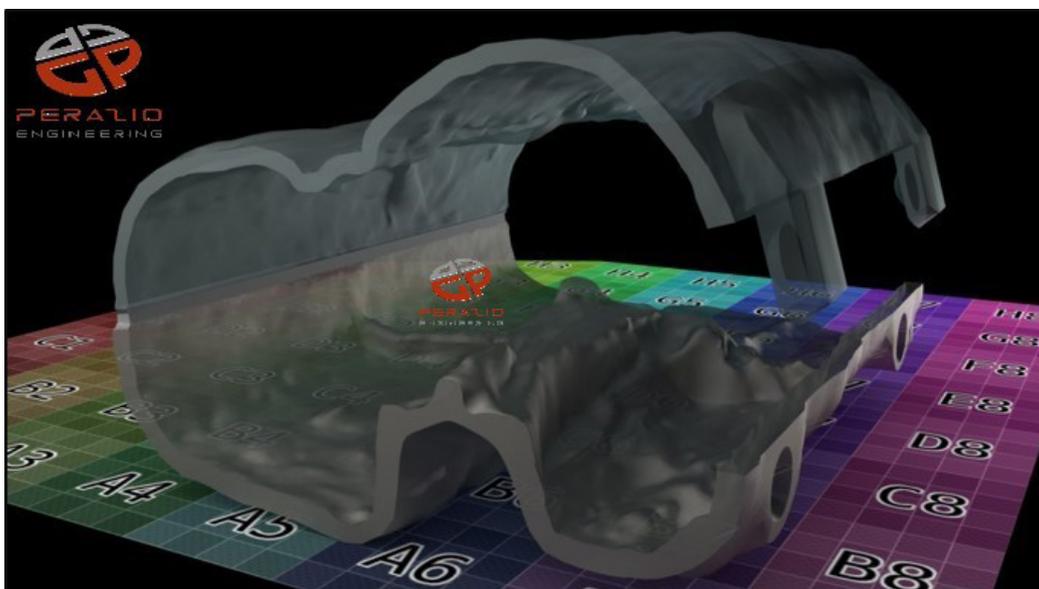


Figure 20 Conception virtuelle du support translucide. © Perazio Engineering.

La surface interne de la gaine est décalée de quelques dixièmes de millimètre pour 2 raisons :

- ne pas endommager la surface des matériaux organiques;
- corriger l’épaisseur de la buse de l’imprimante 3D.

Au final, la modélisation précise des fragments (**fig. 21**) a permis d'obtenir un maintien parfaitement ajusté et sans contrainte.

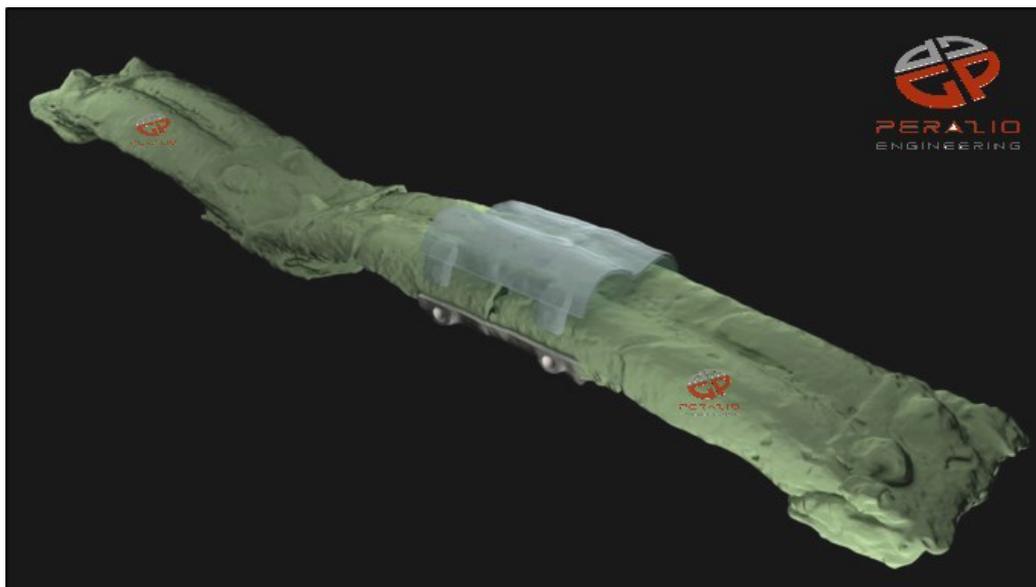


Figure 21 Adaptation virtuelle du support translucide. © Perazio Engineering.

Le fichier 3D a ensuite été envoyé à la société 3D Inlab pour impression par la technologie 3D Polyjet (**fig. 22**).

Plusieurs essais sont effectués afin d'ajuster la gaine sur les deux longues plaques en fer désolidarisées.

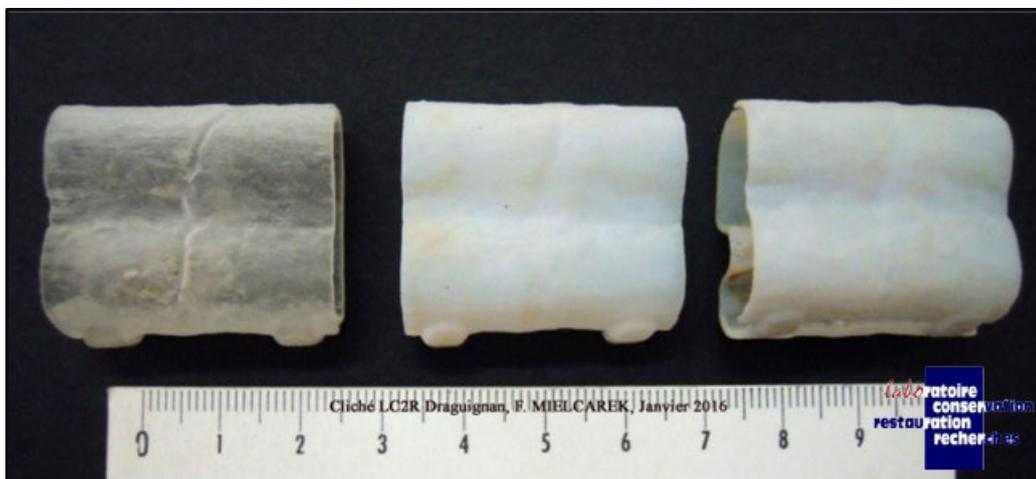


Figure 22 Impression 3D Polyjet du support translucide (gaine). © LC2R Draguignan.

Les **figures 23** et **24** permettent de découvrir le résultat final (avers et revers). Il est possible de teinter cette gaine et de la remplacer à la demande.

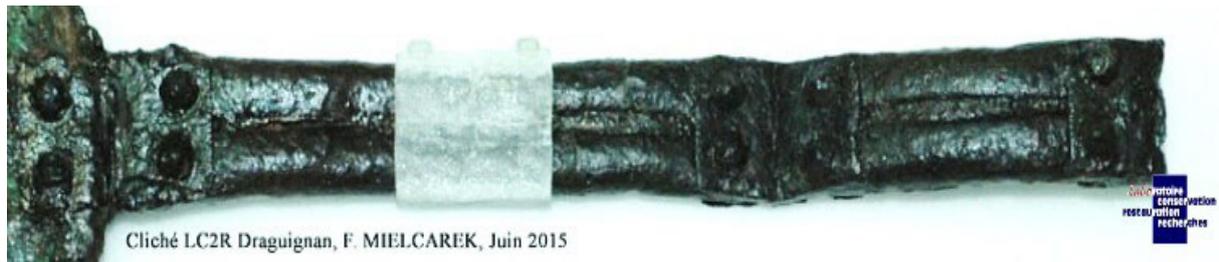


Figure 23 Résultat final obtenu après positionnement de la gaine (avers). © LC2R Draguignan.

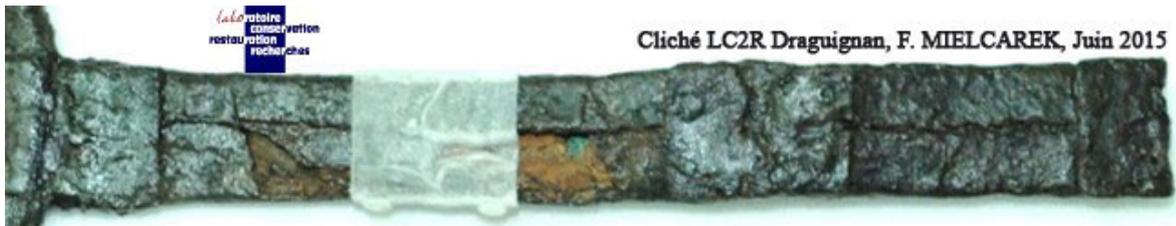


Figure 24 Résultat final obtenu après positionnement de la gaine (revers). © LC2R Draguignan.

Conclusion

Les techniques présentées dans cet article, micro tomographie et numérisation 3D, sont quelques exemples de technologies non destructives et non invasives. Elles permettent :

- de modéliser complètement un objet;
- de le manipuler virtuellement sur écran;
- de conserver et d'archiver les découvertes;
- d'assister les conservateurs-restaurateurs dans leurs recherches;
- de développer des collaborations scientifiques avec le secteur public et le monde industriel;
- de diffuser les connaissances auprès des professionnels, des étudiants et du grand public.

Ces nouvelles technologies ont permis :

- d'améliorer sur les jambières la lisibilité du décor « incisé » et de retrouver en certains endroits l'empreinte du décor endommagé par la corrosion;
- de réaliser une étude scientifique descriptive, puis comparative, et de faciliter ultérieurement leur présentation muséographique.

Remerciements

Les auteurs remercient leurs partenaires de Perazio Engineering (José Péral et Serge Valcke), de Digiscan 3D (Vincent Lacombe), de Studio Guichard (Lionel Guichard), de 3D INLAB (François Malaplate), du CEREGE (Perrine Chaurand) et du CEA Cadarache (Jean-Luc Pettier).

Leurs remerciements vont tout particulièrement à Jean-Claude Ottaviani, conservateur en chef des musées départementaux de la Haute-Corse et du musée départemental d'Archéologie d'Aléria, à la retraite, à Jean-Michel Bontempi, archéologue, adjoint du patrimoine du musée départemental d'Archéologie d'Aléria et, également, à Joseph Césari, ancien conservateur régional de l'Archéologie DRAC Corse, et Franck Léandri, directeur régional des Affaires culturelles de Corse.

Références bibliographiques

Kartaki E. (2017), « The use of computer tomography for creating virtual archives of conservation condition reports. The case study of a 17th century casket », dans Vavouranakis G. Katsianis, M., Papadatos Y., Mouliou M., Peditris P. (ed.) *Digital pasts for the present – Proceedings of the 2nd Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Greek Chapter (CAA-GR). Athens, 20-21 December 2016*, Athens, p. 105-113.

Minozzi S., Giuffra V., Bagnoli J., Paribeni E., Giustini D., Caramella D., Fornaciari G. (2010), « An investigation of Etruscan cremations by computed tomography (CT) », *Antiquity* 84 (323), March 2010, p. 195-201.

Nicolas T., Gaugne R., Tavernier C., Gouranton V., Arnaldi B. (2016), « La tomographie, l'impression 3D et la réalité virtuelle au service de l'archéologie », *Les Nouvelles de l'archéologie*, n° 146, p. 16-22.

Noel J., Subsol G., Mafart B., Guipert G., Gascuel J.-D. (2005), « Les collections muséographiques en 3D par micro tomographie rayons X », tiré à part des *Actes du colloque Virtual Retrospect 2005, Biarritz 8, 9 et 10 novembre 2005*, p. 1-5.

Les auteurs

Françoise Mielcarek* Conservateur-restaurateur métal/matériaux composites, LC2R; associée de la SCOP LC2R et référent Hygiène et Sécurité, LC2R, fra.mielcarek@gmail.com

Sébastien Brzuchacz Coordinateur métier Tomographie - Pôle EPI - CETIM, Sebastien.Brzuchacz@cetim.fr

* Auteur auquel doit être adressée la correspondance.