

ANALYSE 3D D'UN AMAS EN ALLIAGE FERREUX D'ÉPOQUE ANTIQUE DÉCOUVERT DANS LE VAR

PATRICK DIGELMANN, ALIX EYMAR, KOSTANTINOS GKARAGIS, JEAN-LUC MARI, SÉBASTIEN MAVROMATIS, FRANÇOISE MIELCAREK

Résumé Dans le cadre d'une collaboration entre les archéologues du Service départemental de l'archéologie du Var et les conservateurs-restaurateurs du LC2R de Draguignan, un projet de fouille virtuelle d'un amas métallique archéologique, découvert sur la commune de Saint-Zacharie, fut initié en 2021. L'objectif est de parvenir, après reconstruction 3D de l'amas métallique à partir de volumes numériques issus de scanners, à segmenter les différents artefacts et permettre leur identification. Cette opération permet d'accéder de manière non invasive à des informations inaccessibles du point de vue macroscopique. Les conservateurs-restaurateurs seront ainsi en mesure de proposer aux archéologues des recommandations pour traiter et/ou conserver les objets. Outre l'intérêt scientifique, les différents documents numériques seront facilement accessibles par la communauté scientifique en favorisant les échanges et la recherche.

Mots clés conservation-restauration, mobilier archéologique métallique, reconstruction 3d, fouille virtuelle, valorisation du mobilier archéologique métallique, CND.

Introduction

En 2019, un amas métallique informe est confié au Laboratoire de conservation, restauration et recherche (LC2R) pour expertise. Un projet de fouille virtuelle de cet amas est proposé, élaboré et piloté par Françoise Mielcarek¹, conservatrice-restauratrice métal/matériaux composites. L'amas scanné par l'intermédiaire d'un CT scanner à rayons X a fait l'objet d'une acquisition sous la forme d'un volume numérique de données.

Le premier objectif du projet est de réaliser une fouille virtuelle de l'amas métallique afin de faciliter le tri virtuel des artefacts et de récupérer, de manière non invasive, différents types d'informations inaccessibles du point de vue macroscopique (dimensions, épaisseurs, états de conservation des objets, etc.). Ce premier tri offrirait aux conservateurs-restaurateurs de distinguer les objets de l'amas à faire traiter en priorité. Ce projet permettrait donc une étude virtuelle voire une reconstruction 3D des objets.

Le deuxième objectif porte sur la mise au point d'un logiciel permettant aux professionnels du patrimoine d'effectuer par eux-mêmes cette fouille virtuelle.

¹ Responsable du projet et autrice à contacter.

Accompagné par le dispositif RUE, le LC2R fut mis en contact avec l'équipe G-Mod du laboratoire d'Informatique et Systèmes d'Aix-Marseille Université – LIS afin de proposer un projet d'étude ou de stage au Master 2. Une étudiante en Master 2 Informatique (parcours Géométrie et Informatique graphique - GIG), Alix Eymar, fut retenue pour un stage de 6 mois au sein du LC2R d'avril à octobre 2021.

Contexte archéologique

De mai à juillet 2008, le service départemental de l'archéologie du Var a réalisé une fouille préventive sur la commune de Saint-Zacharie sous la direction scientifique de Patrick Digelmann. Cette opération, réalisée préalablement à la construction du collège des Seize Fontaines, a mis au jour le plan complet d'un bâtiment de ferme avec logis et cour, occupé entre la fin du I^{er} et la fin du II^e s. ap. J.-C. Deux zones ont été identifiées par le diagnostic de 2007 (**fig. 1**).

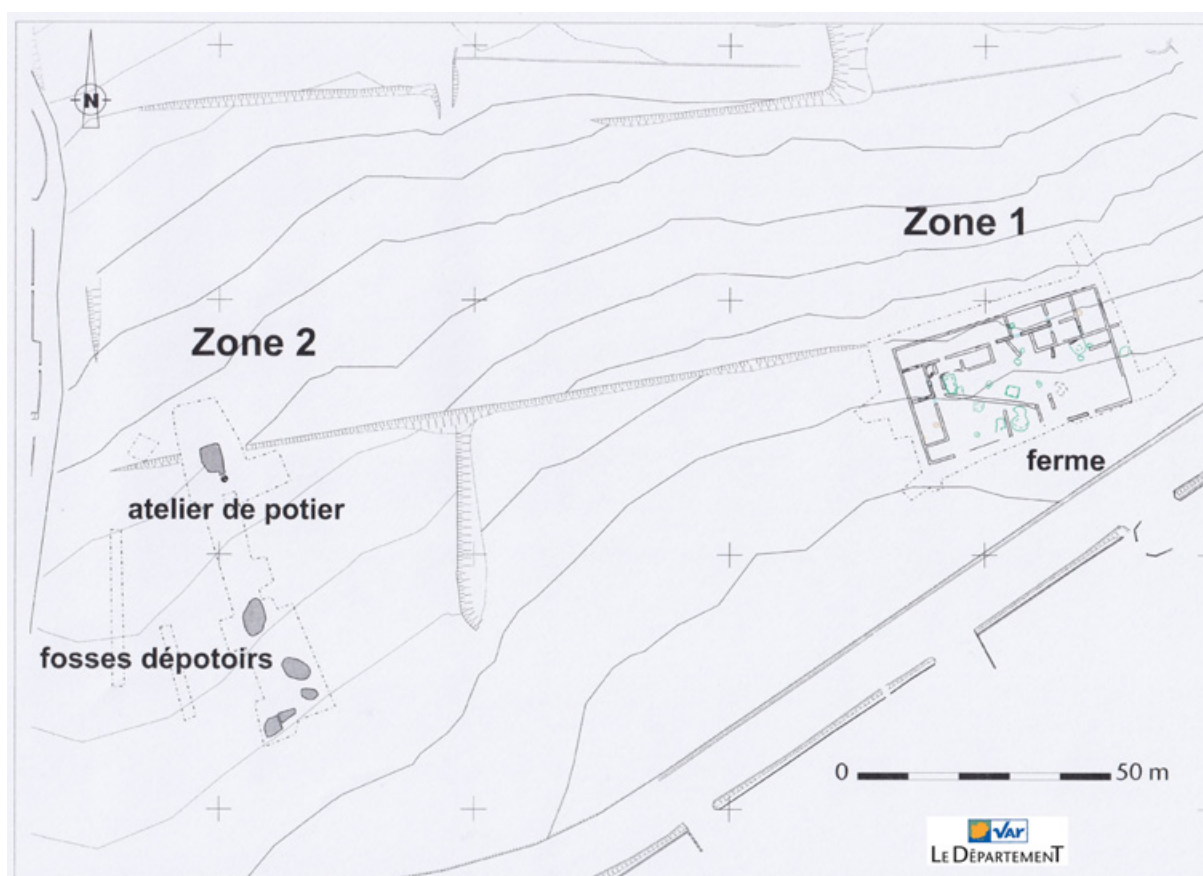


Figure 1 Saint-Zacharie, Collège. Plan des fouilles de la zone 1 (ferme) et de la zone 2 (atelier de potier).
© Patrick Digelmann, Service départemental de l'archéologie du Var.

Dans la zone 1, une ferme rustique du Haut-Empire (fin du I^{er} à fin du II^e s. ap. J.-C.), de 42 m par 24 m, avec un corps de bâtiment en forme de L et une grande cour attenante délimitée par un mur de clôture, fut intégralement fouillée sur une superficie de 1000 m² (Digelmann, Rodet-Belarbi, 2017).

Dans la zone 2, la fouille a mis au jour un atelier de potier, daté par sa production de céramiques et par l'archéomagnétisme de la première moitié du V^e siècle, ainsi que des fosses d'extraction d'argile (Digelmann *et al.*, 2010).

L'amas métallique fut découvert dans la pièce 20 située à l'extrémité sud du corps de bâtiment (zone 1), le long du mur Mr35, à côté d'une entrée cochère (fig. 2). Il pourrait s'agir d'un enclos - dépourvu de toiture - et réservé au gros bétail.



Figure 2 Saint-Zacharie, Collège. Plan des fouilles de la zone 1 avec localisation de l'amas ferreux dans l'angle sud-est de la ferme. © Patrick Digelmann, Service départemental de l'archéologie du Var.

Expertise du LC2R

Cet amas (fig. 3) fut confié au LC2R en 2019 pour expertise. Suite à la couverture photographique et radiographique, l'amas a ensuite fait l'objet d'un constat d'état.

Ses dimensions sont : L = 24,5 cm ; l = 16,5 cm et son poids de 1667 g.



Figure 3 Amas métallique brut de fouilles (avers et revers). © Françoise Mielcarek, LC2R Draguignan.

Tout au long de ce processus, les opérations de manipulation de l'amas se sont avérées délicates en raison de sa grande fragilité. Une discussion s'est alors engagée avec les archéologues avec présentation d'un « plan d'action ».

Le budget restauration étant limité, une autre approche plus innovante fut mise en place afin d'accéder de manière non invasive aux informations pour les transmettre aux archéologues et pour cibler les objets qui seront destinés à être restaurés ultérieurement.

Un projet de « fouille virtuelle de l'amas » fut élaboré et proposé aux archéologues. Pour mener à bien ce projet, une démarche a été entreprise auprès du dispositif RUE, qui facilite le Rapprochement Université / laboratoires – Entreprises. Ce dispositif a permis de contacter l'équipe G-Mod du laboratoire d'Informatique et Systèmes d'Aix-Marseille Université - LIS et cette rencontre a donné lieu à la rédaction d'une offre de stage auprès des étudiants de cette université.

Une étudiante en Master 2 Informatique (parcours Géométrie et Informatique graphique – GIG), Alix Eymar a été retenue pour un stage de 6 mois au sein du LC2R d'avril à octobre 2021.

Les principaux objectifs de ce stage sont les suivants :

- visualiser correctement les différents objets emprisonnés et, ce, de manière non invasive;
- effectuer un premier tri virtuel (dimensions, épaisseurs, état de conservation, etc.);

- planifier les interventions en fonction des budgets alloués;
- permettre l'étude, la reconstruction 3D des objets voire leur impression 3D.

L'objectif final vise donc à faciliter les échanges avec la communauté scientifique et à développer la valorisation du mobilier métallique archéologique.

Acquisition des images scanner

L'amas métallique fut radiographié au moyen d'un CT scanner (computed tomography scanner) à rayons X à la polyclinique de Draguignan par le Dr. Konstantinos Gkaragis.

Le scanner a été configuré à 140 kV, ce qui correspond à une des configurations d'énergie les plus élevées pour traverser les objets métalliques corrodés contenus dans l'amas et les faire apparaître clairement sur les images. Le volume numérique obtenu, en $512 \times 512 \times 809$ pixels, se compose d'une pile d'images en coupes au format DICOM (fig. 4), principalement utilisées dans le domaine de l'imagerie médicale, chaque coupe représentant une tranche d'un objet. Les intensités des pixels dans l'image correspondent à des niveaux de gris, eux-mêmes associés à une UH, ou unité de Hounsfield, permettant de mesurer la radiodensité d'un objet ou d'un corps. Le calcul de cette radiodensité se fait en fonction des valeurs standards configurées pour le scanner.

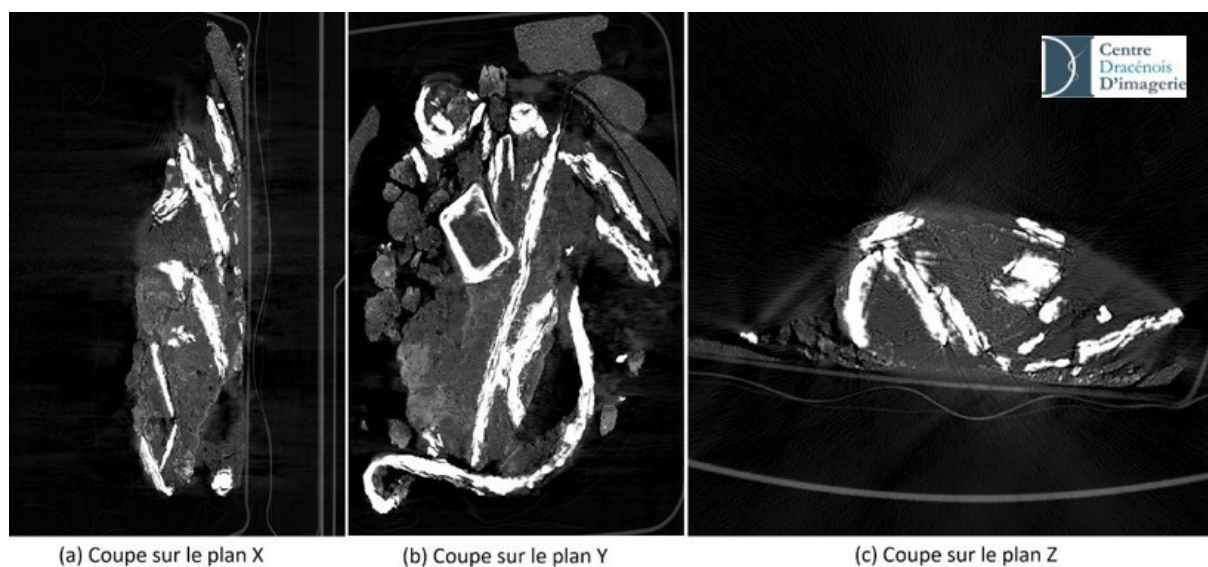


Figure 4 Images sous format DICOM en $512 \times 512 \times 819$ pixels.
© Konstantinos Gkaragis, Centre d'imagerie médicale dracénois, Draguignan.

Traitement et représentation en 3D de l'amas

Après récupération du volume numérique de l'amas et visualisation 2D, une méthode à appliquer fut déterminée pour obtenir un premier résultat.

Les objets, d'intensité très élevée, apparaissent blancs à l'écran et on observe également la présence de sédiments mêlés aux produits de corrosion. Ces éléments allogènes, présents autour des objets, empêchent la bonne visualisation des objets en 3D. Ils doivent donc être éliminés à l'aide d'un nettoyage sur les images.

La première étape a consisté à appliquer un seuillage (**fig. 5**) sur les images, destiné à nettoyer et à effectuer une forme de binarisation. La binarisation est un procédé qui permet de créer une image possédant deux classes de pixels : les pixels que l'on souhaite garder et ceux que l'on souhaite ignorer. Le seuillage s'effectue en décidant d'une valeur d'intensité maximum et d'une valeur d'intensité minimum, ce qui permet de récupérer les pixels aux intensités situées entre ces deux valeurs. Les pixels dont l'intensité est inférieure et/ou supérieure aux valeurs minimum et maximum seront définis à zéro et apparaîtront noirs sur l'image, les intensités minimum et maximum devront être choisies par un utilisateur. Cela permet de se concentrer uniquement sur les objets métalliques.



Figure 5 Traitement de seuillage appliqué sur les images sous format DICOM
 © Konstantinos Gkaragis, Centre d'imagerie Médicale Dracénois, Draguignan
 et © Alix Eymar, Aix-Marseille Université, LIS, Équipe G-Mod, Marseille.

Une fois le nettoyage des volumes numériques effectué, on cherche à définir les contours des objets contenus dans l'amas (**fig. 6**), c'est-à-dire la limite entre le fond de l'image et les objets. La détection des contours s'effectue en regardant pour chaque pixel dans l'image les 8 pixels voisins qui l'entourent. Considérant le fond de l'image à l'intensité 0, et les objets à une intensité I , pour un pixel courant à l'intensité I , si au moins un de ses voisins est d'intensité 0, et qu'au moins un voisin à une intensité différente de 0, alors le pixel traité peut être considéré comme un point de contour. À l'aide de cette méthode, on traite toute l'image pour ne retenir que les pixels qui nous intéressent. Pour chaque pixel, on récupère sa position (x,y) sur l'image, ainsi que sa position z qui correspond à la coupe dans le volume, et on sauvegarde l'information dans un fichier texte au format XYZ. Le format XYZ est un format

simple d'utilisation qui peut stocker des positions, des couleurs et d'autres informations sur les points. Ce fichier pourra par la suite être importé dans l'application pour afficher l'amas sous forme d'un nuage de points dans une vue 3D.

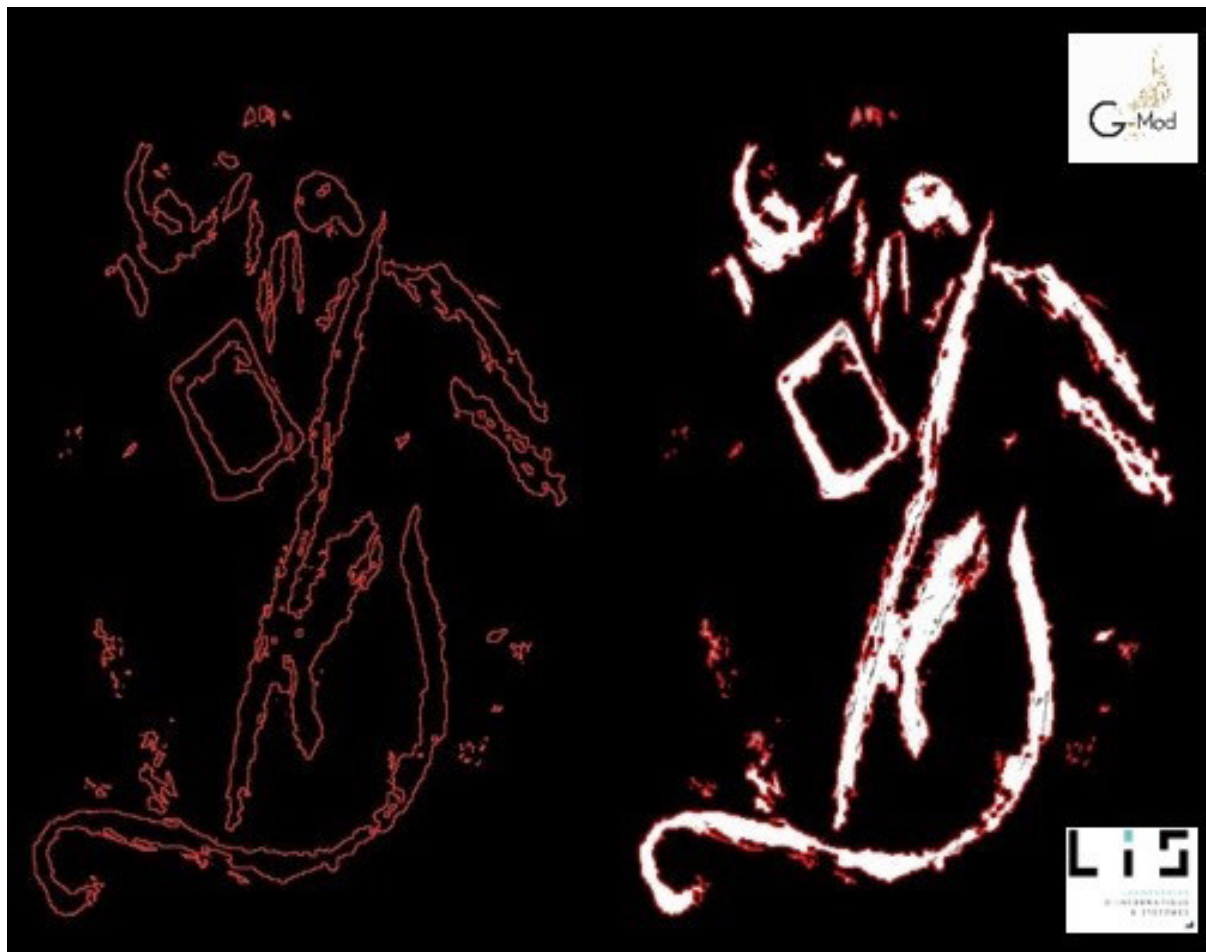


Figure 6 Définition des contours des objets.

© Alix Eymar, Aix-Marseille Université, LIS, Équipe G-Mod, Marseille.

Après avoir établi un état de l'art des connaissances, certains algorithmes, ainsi que des outils informatiques, ont été retenus pour la visualisation 3D de l'amas, notamment la librairie python Open3D, qui a amené à la représentation de l'amas sous forme d'un nuage de points. Cette librairie peut prendre un fichier XYZ en entrée et afficher les points contenus dans ce dernier au sein d'une vue 3D. La représentation de l'amas sous forme d'un nuage de points permet tout d'abord d'avoir une structure de données simple, car il suffit uniquement de gérer l'affichage de points à l'écran et non pas d'un maillage complet avec des faces et des arêtes au sein de la structure. On allège ainsi l'affichage du volume et on conserve aussi avec une plus grande fidélité la géométrie de l'amas, sans passer par une approximation des surfaces, comme ce serait le cas avec un maillage. Le choix d'un nuage de points permet aussi d'envisager par la suite une reconstruction du volume sous forme d'un maillage pour effectuer des analyses plus poussées, comme la détection de fissures, ou encore de collages d'éléments brisés par analyse des cassures. Certaines de ces analyses nécessiteront probablement la représentation de l'amas sous la forme d'un maillage.

Ces différents traitements ont permis la représentation 3D de l'amas sous forme de nuages de points colorés (fig. 7).



Figure 7 Représentation 3D de l'amas sous forme de nuages de points colorés.
 © Alix Eymar, Aix-Marseille Université, LIS, Équipe G-Mod, Marseille.

Segmentation supervisée de l'amas

Une segmentation est réalisée avec l'aide de la bibliothèque Open3D, qui offre le moyen d'effectuer un découpage manuel sur un nuage de points importé dans le logiciel de visualisation 3D. Grâce à cette fonctionnalité, il est possible d'effectuer une première segmentation manuelle de l'amas et de séparer chaque objet. Cela a permis dans un premier temps d'analyser les objets séparément et d'observer certains détails comme des cassures ou des perforations. Chaque objet découpé peut ensuite être sauvegardé au format PLY et être importé à nouveau dans la vue 3D pour être observé et manipulé.

Suite à la reconstruction 3D de l'amas, une segmentation supervisée a donc été réalisée de manière manuelle (**fig. 8**).

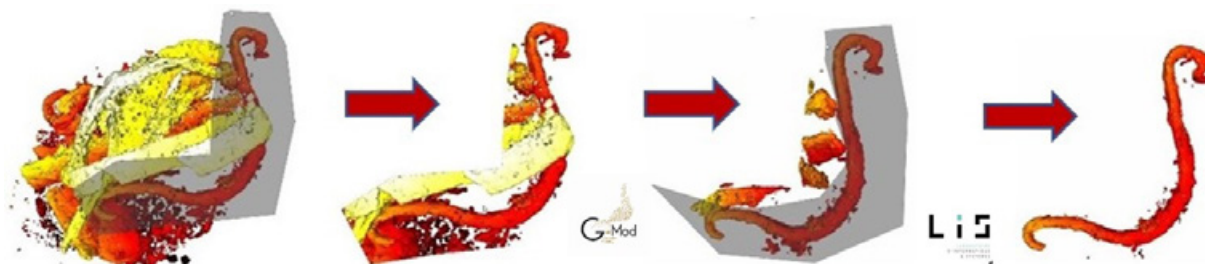


Figure 8 Différentes étapes de la segmentation partielle du nuage de points.
 © Alix Eymar, Aix-Marseille Université, LIS, Équipe G-Mod, Marseille.

Cette méthode a permis l'extraction virtuelle d'une dizaine d'objets présents dans l'amas : une sonnaile en alliage cuivreux dépourvue de battant et présentant un anneau de suspension incomplet, un piton en fer dont l'extrémité est recourbée, un anneau associé à un petit anneau en fer, une anse en fer, un élément indéterminé en fer, un clou en fer, une serpette en fer dont l'extrémité est cassée, une plaque en fer avec trois perforations, des plaques en fer recourbées et cassées (**fig. 9**). Elle a en outre amélioré la visualisation des outils et des informations masquées par les sédiments et les produits de corrosion.

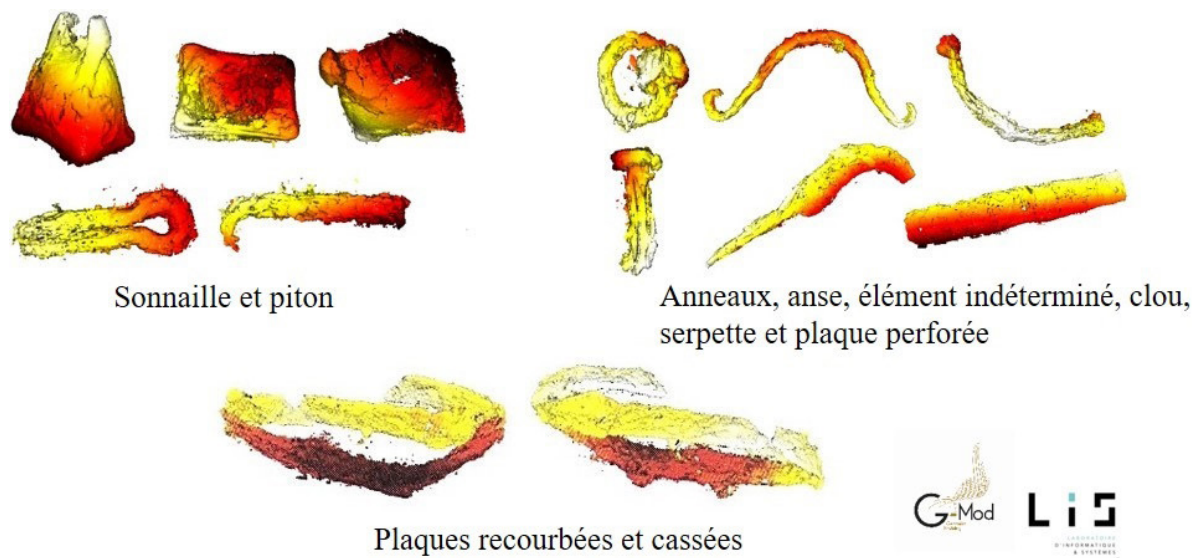


Figure 9 Mise en évidence d'une dizaine d'outils.
 © Alix Eymar, Aix-Marseille Université, LIS, Équipe G-Mod, Marseille.

Conclusion

Ce projet effectué dans un laboratoire de conservation-restauration dans le cadre d'une prise en charge et d'une expertise d'un amas métallique montre l'intérêt d'une collaboration multidisciplinaire.

En effet, ce travail de Master 2 GIG de 6 mois a permis de :

- développer une application pour l'affichage et le traitement des données DICOM;
- générer un nuage de points représentant l'amas et les objets;
- développer une application pour la visualisation, la segmentation des nuages de points et l'exportation des objets au format PLY.

Les perspectives envisagées sont d'effectuer plusieurs acquisitions avec des niveaux d'énergies différents de 140 kV et d'obtenir des piles d'images DICOM à haute définition $2000 \times 2000 \times 809$ pixels, permettant de stocker davantage d'informations sur les objets et sur leurs géométries. Un autre point déjà abordé est la reconstruction de l'amas en un maillage à partir du nuage de points déjà obtenu. Pour cela, l'algorithme du marching cube serait parfaitement adapté, car les données nécessaires à son fonctionnement sont déjà à notre disposition.

Une autre amélioration serait la création d'une application simple d'utilisation et accessible à tous les professionnels du patrimoine, intégrant la visualisation de volumes numériques, de nuages de points et éventuellement de maillages, avec un accès à des outils de mesures, l'intégration d'annotations et de retouche manuelles. La visualisation 3D de l'amas est désormais réalisable, mais la segmentation est encore limitée, c'est pourquoi une des évolutions possibles serait d'avoir accès à une segmentation semi-automatique.

En tant que professionnelle de la conservation-restauration du patrimoine, le développement préliminaire de cette application a permis :

- de visualiser et de manipuler les objets en 3D;
- d'accéder à des informations complémentaires;
- de réaliser rapidement des études parfaitement non-invasives.

Cet outil doit être considéré à la fois comme une aide au diagnostic pour identifier les objets archéologiques métalliques, à terme leur état de conservation et comme une aide à la décision et à la planification des interventions. En effet, dès qu'un objet est extrait de son site de fouille, l'équilibre avec son environnement est perturbé et des processus d'altération se mettent en place et peuvent conduire à des pertes irréversibles des informations qu'il renferme avant qu'une décision soit prise pour sa dévolution et son traitement.

Il pourrait également servir de support de communication 3D pour la valorisation des artefacts exhumés. L'archivage et l'exploitation des données seront facilités et permettront de développer les échanges entre les professionnels du patrimoine voire le grand public.

À terme, cet outil pourrait favoriser l'émergence de nouvelles pratiques professionnelles ou de nouveaux métiers

L'objectif général du projet est de promouvoir l'étude et la valorisation des objets archéologiques métalliques en réalisant des fouilles et des études virtuelles. Cette démarche rentre parfaitement dans le cadre de la loi 2001 sur l'archéologie préventive, qui stipule que la stabilisation doit-être favorisée par rapport à l'intervention directe sur les objets.

Le principal enjeu de ce projet est de faciliter l'accès des différents acteurs de l'archéologie à la modélisation 3D.

Références bibliographiques

- Digelmann P.**, avec la collaboration de **Conte A., Gébara C., Borréani M. et Laurier F.** (2010), « Une production inédite en Provence dans l'Antiquité : les céramiques de type "Luisante" du four de Saint-Zacharie (Var) », *BAP*, 33, p. 91-104.
- Digelmann P.**, Rodet-Belarbi I., (2017), « Pratiques rituelles en milieu rural. Note sur un dépôt d'offrandes dans un établissement agropastoral du Haut-Empire (Saint-Zacharie, Var) », *BAP*, 38, p. 29-63.

Les auteurs

Patrick Digelmann Archéologue de collectivité et responsable d'opération au Service départemental de l'archéologie du Var. Spécialiste de la période romaine et de l'archéologie rurale, il réalise des fouilles et des diagnostics sur l'ensemble du département du Var depuis vingt ans. Il est chercheur associé à l'UMR 7268 (Université Côte d'Azur – CEPAM), pdigelmann@var.fr

Alix Eymar Développeuse, diplômée de la faculté des sciences de Luminy d'un master en Géométrie et Informatique graphique (GIG), obtenu en septembre 2021. C'est vers avril 2021, à la fin de son master 2, qu'elle a commencé à travailler sur le projet de fouille virtuelle de l'amas archéologique dans le cadre de son stage de fin d'étude. Ayant rejoint l'équipe de la société Reactiv'IP à la fin de ses études, elle se concentre principalement aujourd'hui sur l'édition de logiciels de traitement d'images, et sur l'amélioration de la librairie IP SDK, qui implémente un grand nombre d'algorithmes dédiés au traitement d'images, eymar.alix@gmail.com

Kostantinos Gkaragis Né le 20/02/1970 à Komotini (Grèce). Il a obtenu son baccalauréat grec en 1987 à Thessalonique. De 1989 à 1996, il a effectué ses études de Médecine à l'université de Liège. De 1996 à 2002, il est devenu assistant à l'université de Liège au service d'Imagerie médicale. Il s'est installé en France en novembre 2002 en tant que docteur spécialiste en radiologie, en tant que PH au Centre hospitalier de Draguignan (jusqu'en 2005) et associé au Centre d'imagerie médicale dracénois. Il a créé en 2008 la SAS Scanner à la clinique Notre-Dame à Draguignan, konstantinos.gkaragis@sfr.fr

Jean-Luc Mari A obtenu son doctorat en Informatique en 2002. Il est devenu maître de conférences en 2003 et a obtenu son « habilitation à diriger des recherches » en 2011. Il est devenu professeur des universités en 2017. Il enseigne à la faculté des Sciences (Aix-Marseille Université) et il est membre du laboratoire d'Informatique et Systèmes (LIS), dans l'équipe G-Mod (Modélisation géométrique). Ses recherches portent sur l'informatique graphique, la modélisation géométrique, la géométrie discrète et plus particulièrement l'extraction de caractéristiques géométriques et topologiques, jean-luc.mari@univ-amu.fr

Sébastien Mavromatis Professeur à l'université d'Aix-Marseille. Il est membre du laboratoire d'Informatique et de Systèmes (LIS), CNRS, UMR 7020 et dirige une équipe de recherche spécialiste du domaine de la modélisation géométrique. Il est régulièrement impliqué dans des projets de coopération internationale en Chine, au Pérou et en Algérie. Il a participé à plusieurs projets de recherche et développement avec des industries françaises et internationales. Ses travaux de recherche s'inscrivent dans les domaines de la reconstruction 3D, l'apprentissage automatique et la réalité mixte, sebastien.mavromatis@univ-amu.fr

Françoise Mielcarek Conservatrice-restauratrice métal/matériaux composites au LC2R de Draguignan depuis août 2005. Diplômée du master de Conservation-restauration des biens culturels à l'université Paris I, Panthéon-Sorbonne, elle intervient sur le mobilier archéologique métallique pour le compte des musées de France, des musées privés et des services archéologiques. Elle est devenue associée de la SCOP LC2R en mars 2012. De plus, en charge de l'hygiène-sécurité au sein du LC2R, elle a mis place les bonnes pratiques de laboratoire (BPL). Ses activités de recherche portent sur le CND et sur les nouvelles technologies appliquées en conservation-restauration pour améliorer l'étude, la valorisation et la préservation du patrimoine, fra.mielcarek@gmail.com

Nous tenons vivement à remercier Amandine Plantivaux, chargée d'affaires, dispositif Rapprochement Université / Laboratoires-Entreprises (RUE), pour son aide dans la mise en place du partenariat entre l'ensemble des collaborateurs.