

# COUPLAGE MACROPHOTOGRAPHIE ET PHOTOGRAMMETRIE

Rémi Brageu  
CNRS UMR 8220, Paris, remi.brageu@upmc

## Résumé

Dans la dernière décennie, la démocratisation des capteurs photographiques de qualité, l'extraordinaire évolution de la capacité des ordinateurs, la mise à disposition via le réseau internet d'artéfacts 3D de toutes sortes ont contribué à ce que la photogrammétrie devienne accessible à tout spécialiste de l'archéologie et d'histoire de l'art. S'il est relativement facile de faire un relevé 3D de fouilles, d'un bâtiment, d'un bas-relief ou d'une statue, des questions surgissent quant aux objets et à leur taille. Cet article, par le biais d'exemples soigneusement choisis, présente diverses approches permettant de réaliser des artéfacts 3D d'objets très petits, très fragiles, très altérés ou ceux appelés à disparaître « pour la science ».

**Mots-clés :** Photogrammétrie, photographie, macrophotographie, modélisation 3D, empilements d'images, archéologie, objets muséaux.

## Abstract

*During the last decade, the democratization of good quality photographic sensors, the tremendous evolution of the computer capacity and the availability of 3D artefacts of all kinds through the Internet have all contributed to make photogrammetry accessible to any archaeology and art history specialist. If it is relatively easy to make a 3D survey of archaeological excavations, of a building, of a bas-relief or of a statue, questions arise regarding the objects and their size. This article, thanks to carefully selected examples, presents various approaches to realize 3D artefacts of very small, highly fragile, highly altered objects or of those destined to disappear "for scientific purposes".*

**Keywords:** Photogrammetry, photography, macrophotography, 3D modeling, image stacking, archeology, museum objects.

## 1. Introduction

Dans le monde de la muséographie, la photogrammétrie remporte de plus en plus de succès. C'est en effet une méthode qui permet d'obtenir, assez simplement, une représentation en trois dimensions d'un objet, que celui-ci soit très lourd, très imposant, très petit ou extrêmement fragile.

Comment réaliser l'artéfact 3D d'un objet minuscule, de quelques fibres de tissu, à fortiori carbonisés, ou d'échantillons portant des concrétions qui ont un fort intérêt archéologique ? On ne dispose bien souvent que de la loupe ou du MEB pour les études. Ces outils ne fournissent que des images en 2D. L'apport de la 3D sur de tels objets est fondamentale car elle permet de les manipuler sous tous les angles, d'en comprendre la fabrication ou les modes de tissages pour les tissus, par exemple, d'avoir un indice de datation et plus généralement de rendre visibles des stigmates d'utilisations ou de conservation.

Parce qu'elle n'utilise que de la lumière et un capteur photographique, la photogrammétrie appliquée aux matériaux constitutifs d'un l'objet muséal, qu'il soit fait de bois, d'or, de cristal ou de plumes, pose beaucoup moins de souci quant à sa reproduction.

## 2. Nécessité du couplage

La photogrammétrie exécutée de façon classique avec un boîtier et une optique trans-standard, offre déjà beaucoup de possibilités (Grussenmeyer, 2003) et (Grussenmeyer, 2016).

Avant d'entrer dans le vif du sujet, commençons par définir ce que l'on entend par petits objets. Selon le

Recueil des règles de numérisation (Anctil et al., 2014) un petit objet est « tout objet plus petit que 10cm, soit des spécimens, boutons, perles, broches, pièces de monnaie... ». Lorsque la taille de l'objet ne dépasse pas les 3 cm de haut sur 1 cm de large, que l'on se trouve dans une problématique de compréhension fine des techniques anciennes ou que l'étude va entraîner sa destruction, il est naturel de se tourner vers la photogrammétrie pour remplir le devoir de mémoire auquel, par éthique, on est tenu : dans ces cas-là, la seule méthode photographique montre rapidement ses limites. Il faut alors envisager de coupler la photogrammétrie et la macrophotographie.

## 3. Matériel utilisé

Sauf mentions contraires, le matériel utilisé pour les constitutions des artéfacts 3D est un Nikon D810 associé à des optiques de 35 mm, 65 mm et 105 mm micro-Nikkor. Souvent la taille de l'objet nous impose d'augmenter le tirage optique, en employant une bague allonge ou en utilisant les soufflets PB IV et PB VI. Cet emploi de dispositifs permettant un fort grossissement n'est pas incongru. En effet une étude récente a montré qu'il était tout à fait possible d'utiliser des objectifs macro pour fabriquer des artéfacts 3D de petits objets (Yanagi et al., 2010).

Le programme de corrélation dense utilisé majoritairement dans cet article est le logiciel 3DSOM pro. Sa simplicité d'utilisation et la facilité d'export des résultats ont permis de reporter toute l'attention sur la prise de vue. Il impose de placer sous l'objet un motif spécifique, calculé au prorata de l'objet photographié. Constitué de plusieurs cercles, de diamètres variables mais connus, il permet d'évaluer la profondeur de l'image. La figure 1 en donne une représentation qu'on nomme

“tapis de bulles”. Le développement complet de cette méthode dépassant largement le cadre de cet article, on se référera à (Heno et al., 2014).

Par ailleurs, afin de faciliter la compréhension du propos, les images montrant la disposition des caméras ont été réalisées à l'aide du logiciel Photoscan Pro d'Agisoft.

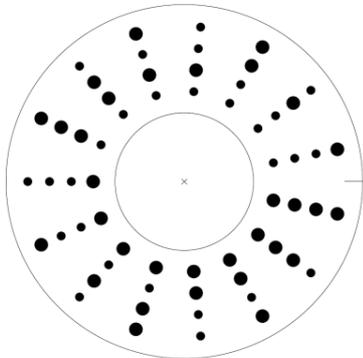


Figure 1 - Tapis de bulles du logiciel 3DSom Pro

### 3.1 Eclairages utilisés

Afin de réaliser une photographie optimale, il est important de se référer au recueil des règles de numérisation à propos de l'éclairage des objets de petite taille (Ancil et al., 2014):

« Pour une photographie sans ombrage : en surélevant l'objet de son arrière-plan, c'est-à-dire en le déposant sur une vitre surélevée à environ 20 cm du fond, les ombrages s'éliminent. Installer une lampe (flash) de chaque côté de la vitre ; les lampes doivent être orientées vers l'objet dans un angle de 45° vers le bas ».

En suivant ce principe, l'éclairage global de la scène est assuré par trois torches d'éclairage continu. Deux sont disposées sur les côtés, la dernière est au zénith. Ces lampes à led fournissent une lumière blanche (type lumière du jour), froide et ont la particularité, essentielle dans le cas de la photographie d'objets muséaux, de ne pas chauffer même après plusieurs heures de fonctionnement. La lumière est modelée via des diffuseurs qui ont pour tâche de la répartir de manière uniforme. Dans une démarche de réduction optimale des reflets de lumière sur l'objet, ce dernier est placé dans une tente d'éclairage. Les premiers plans sont souvent mal éclairés et soumis à des ombres très marquées. On « débouche » ce premier plan en utilisant un dispositif annulaire à led vissé directement sur l'objectif. La lumière est filtrée soit par du « tough spun »<sup>1</sup>, soit par du papier calque.

### 3.2 Dispositif de prise de vue

Quatre préoccupations majeures gouvernent la séance de prise de vue. En premier lieu, la sécurité des objets muséaux doit toujours être maximale. La taille de l'objet est ensuite à considérer. On cherchera souvent à ce que ce dernier soit entièrement contenu dans le viseur afin qu'une seule bande d'image soit suffisante pour en faire

<sup>1</sup> <http://makingvideo.free.fr/pdf/bien-utiliser-diffuseurs.pdf>

le tour. A celle-ci viennent s'ajouter, si besoin, quelques clichés pour le zénith et le nadir. Les dimensions de l'objet vont très souvent imposer, d'une part, une distance lentille frontale-objet minimale et, d'autre part, un tirage optique fortement augmenté. Afin de réaliser le meilleur artefact 3D, il est obligatoire que deux clichés contigus se superposent à plus de 75 %. Au moment de la prise de vue, ce pourcentage se traduit par un angle de 5° entre deux clichés successifs. Les contraintes liées aux œuvres (assurances, disponibilité, environnement contrôlé, fermeture des musées, lieux d'exposition, salles d'examen...) font qu'il est plus simple de déplacer l'opérateur plutôt que l'objet. Il est donc nécessaire de disposer d'un matériel transportable, rapidement opérationnel et d'un encombrement au sol minimal.

Ces quatre contraintes, sécurité, superposition des clichés, petitesse des objets, mobilité, ont conduit à la conception et à la réalisation d'un dispositif portable et léger permettant d'assurer une séquence de macro-photogrammétrie.

#### Description du dispositif

Complètement expérimental, celui-ci a été entièrement réalisé, aménagé et amélioré par Thierry Guillou, responsable de toutes les fabrications mécaniques au laboratoire.

Comme le montre la figure 2, ce dispositif se compose de deux ensembles: le premier soutenant l'objet et le second assurant le support et la rotation du dispositif optique. Une grande plaque d'aluminium gravée de 5° en 5° sur 360 degrés prend en charge le bon positionnement de l'appareil. Cette plaque est surmontée d'un dispositif très stable qui reçoit l'objet à étudier. Deux barres parallèles viennent assurer la rigidité et le couplage de l'ensemble. Une grande variété d'objets peut ainsi être traité car elles sont extensibles jusqu'à 2,5m.



Figure 2 - Le dispositif de prises de vues

## 4. Objets d'études

Un premier essai de représentation d'un objet muséal par photogrammétrie a été tenté au laboratoire, dans le cadre de la thèse de Mariam Samaan (Samaan et al., 2013). La demande issue des musées s'est rapidement portée sur des objets beaucoup plus petits et nécessitant le couplage entre photogrammétrie et macrophotographie.

Cet article présente des résultats ainsi obtenus pour un biface, un calcul rénal papal et un cristal d'alun servant de support à une potion papale. Des axes de recherche et de développement futur seront ensuite abordés avec l'aide d'un tissu copte et d'objets votifs d'origine Muisca (Colombie actuelle).

#### 4.1 Le biface

Le sujet de cette étude nous a été proposé par Jean Sainty, préhistorien spécialiste en archéologie des techniques du Centre Expérimental de Préhistoire Alsacienne (CEPA). Afin de comprendre comment les bifaces étaient façonnés et comment ils étaient employés, l'archéologue en a taillé un à partir d'une pierre à silex de manière à pouvoir observer les empreintes laissées par la taille avec celles observées sur les silex travaillés trouvés en fouilles (cf. Figure 3). Les deux arêtes latérales n'ont pas la même apparence. L'une est vierge de toute utilisation et l'autre est utilisée pour couper des peaux, de la viande, du bois...

La photogrammétrie, par un effet d'amplification visuelle, permet une comparaison aisée des deux arêtes du silex expérimental.

Un objectif de 65 mm micro Nikkor et 70 images ont suffi à en faire le tour. Les images suivantes montrent le résultat après calcul de la corrélation dense et de la texture.

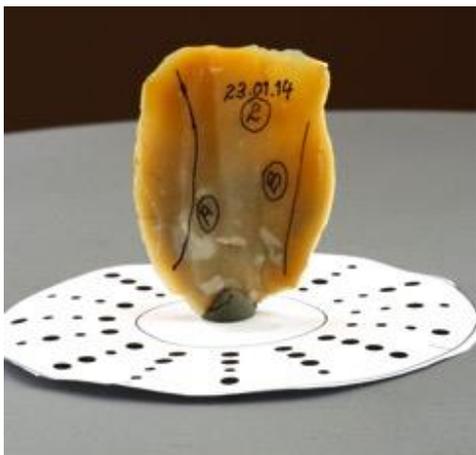


Figure 3.a Biface



Figure 3.b Représentation 3D du biface

Avec le biface nous sommes à la limite de la proxy photographie, penchons-nous maintenant sur un objet qui est complètement dans ce domaine.

#### 4.2 Le calcul rénal papal

Le calcul Papal provient directement de la *Spezieria di Santa Maria della Scala*, à Rome (Italie): la pharmacie des Papes. Fondée, au XVIe, par des frères carmélites de l'Ordre des Frères déchaux et les Moniales déchaussées de la bienheureuse Vierge Marie du Mont-Carmel (ordres mendiants) et sise dans le cloître de l'église Santa Maria della Scala, cette pharmacie devint très rapidement célèbre. Le pape Clément VIII, dans les années 1500, lui adjointra un monastère, encore occupé aujourd'hui par les frères, ouvert au public à la fin du XVIIe siècle. Cette pharmacie de grande réputation sera, dans les années 1970, transférée au premier étage du monastère dans une pharmacie moderne. L'antique pharmacie est aujourd'hui un musée.

Ce calcul rénal fait partie d'un programme de recherches développé par Maria Louisa Vasquez de la faculté de géographie et l'histoire de l'université de Valence en Espagne.

L'état de conservation de l'objet est très préoccupant. En effet chaque manipulation le réduit en poussière un peu plus. La photogrammétrie est donc la méthodologie idéale pour réaliser les observations non invasives.

L'image suivante (cf. Figure 4) présente ce calcul rénal sur un support, le tout posé sur un "tapis de bulles" de 50mm de diamètre. La mire donne une idée de la dimension de l'objet. On voit clairement que ce calcul rénal tient dans un volume de 3 cm<sup>3</sup> au maximum. L'optique utilisée pour cette prise de vue est un 105 mm microNikkor.



Figure 4.a : Calcul rénal papal



Figure 4.b : Représentation 3D du calcul rénal papal

Les exemples suivants, en allongeant le tirage optique, vont mettre en œuvre le couplage entre la photogrammétrie et la macro photographie

#### 4.3 Le cristal d'Alun et la médication papale

Provenant de la même pharmacie Santa Maria della Scala à Rome, un cristal d'alun suscite l'intérêt de la communauté des chercheurs en médecines anciennes, par le composé organique jaune dont il est le support.

Les analyses scientifiques déterminant la composition de la substance organique vont malheureusement entraîner sa destruction. Il est donc important de conserver un témoignage de ce cristal. N'utilisant que de la lumière naturelle, la photogrammétrie est non intrusive, non destructive, et donc mieux adaptée, pour en réaliser un modèle 3D.

La petitesse de l'objet, de l'ordre d'un cm<sup>3</sup> au maximum, impose de coupler un objectif 105 mm avec un soufflet. La recherche de la meilleure image possible amènera le tirage du soufflet à 75 mm. Il faut être conscient du poids important du triptyque boîtier – soufflet – objectif lors des différentes manipulations que l'on sera amené à effectuer.

La comparaison entre l'objet et les images issues de la corrélation dense signale un très grand décalage dont les causes, multiples, seront explicitées lors du prochain exemple.



Figure 5.a: Cristal d'alun

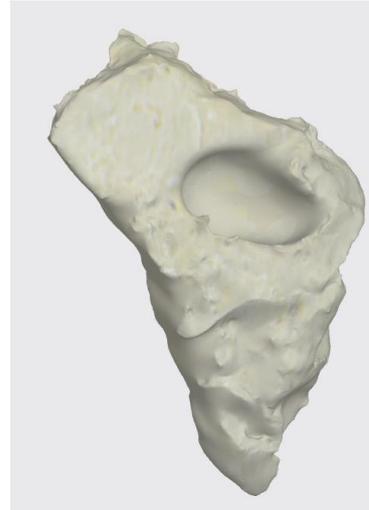


Figure 5.b représentation 3D du cristal d'alun

#### 4.4 Le tissu copte

Ce fragment de tissu, d'époque byzantine (1er siècle ap. J.-C., Haute Egypte) provient d'une collection privée.

D'une petitesse extrême (0.2mm\*0.3mm), le challenge pour la photogrammétrie, était de savoir si l'on pouvait réaliser un artefact 3D, impliquant la mise en œuvre d'une focale équivalente, la plus grande possible. Le soufflet est amené à son tirage maximum, soit 150 mm. Selon les lois de l'optique géométrique pour augmenter encore plus le grossissement, il est nécessaire de positionner une optique grand-angle ou semi grand angle avant le soufflet. Un 30 mm est donc utilisé.

La lentille frontale de l'objectif se situe alors à moins de 2 mm de l'échantillon. Eclairer correctement ce dernier est un nouveau défi. Compte-tenu des résultats obtenus avec le cristal papal, une attention toute particulière a été portée au poids du triptyque appareil photo-soufflet-optique. Afin de le réduire, nous avons opté pour un boîtier plus ancien et plus léger, qui permet une meilleure maîtrise de la zone de netteté au niveau de chaque image. Comme le montre la photo ci-dessous, un peu de plastiline neutre sert de support à l'échantillon. Le tapis de bulles placé en dessous de l'échantillon nous permet de calculer l'axe Z. Une série 80 images, pour la fabrication de l'artefact 3D, a été confectionnée.

Une fois les zones d'intérêt principal définies, les images ont traitées par le logiciel 3D SOM Pro. Aucun résultat satisfaisant n'a été obtenu. Le « tapis de bulle » est responsable de cet échec du fait de sa très petite taille, 20mm. A cette dimension les petits cercles noirs sont tous identiques et le logiciel de corrélation n'a alors plus ses repères.

On va alors faire traiter les images par le logiciel Photoscan d'Agisoft qui, comme le montrent les images, arrive très facilement à positionner les caméras par rapport à l'objet (cf. Figure 6).

L'étape de corrélation dense nous fournit un maillage totalement exploitable. Toutefois le logiciel se révèle incapable de fournir un modèle parfaitement texturé. En

effet il n'y a que très peu de différence entre chaque image et quasi aucune du côté de la texture. Il s'ensuit une très grande confusion.



Figure 6.a: Le tissu réel

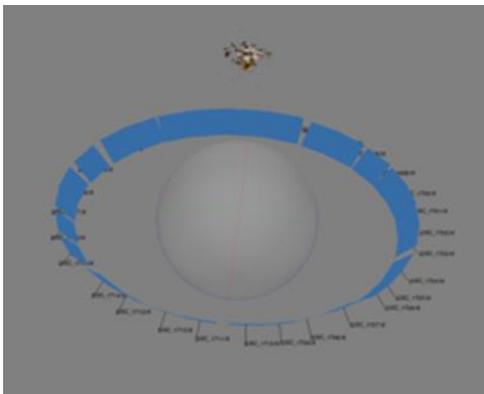


Figure 6.b: le placement des caméras



Figure 6.c : L'objet 3D

#### 4.5 Les objets votifs Muisca

Dans certains cas, les objets présentent une telle fragilité que l'opérateur de photogrammétrie ne peut pas manipuler. C'est notamment le cas des figurines votives des populations Muisca (cf. Figure 9). D'origines amérindiennes, ces représentations sont constituées d'une très fine plaque d'or surchargée de filaments d'or également. Ces objets sont très petits (1.5 cm de large sur 5 cm de haut et moins de 2 mm d'épaisseur en général). Ils ont pour la plupart leur face supérieure richement ornée et la face inférieure parsemée de petits grains d'or. Leur finesse et leur fragilité imposent à la fois l'utilisation d'une loupe binoculaire et d'autre part un

personnel spécifiquement formé. Comment, dans ces conditions, appliquer la photogrammétrie à de tels objets patrimoniaux?

Les contraintes liées à ces objets imposent que le photogrammètre ne peut manipuler lui-même l'objet ni même tourner autour. Il doit donc guider l'opérateur de la loupe binoculaire pour obtenir des images photogrammétriquement exploitables. La plupart des loupes binoculaires des musées n'étant pas équipées d'écrans de retour vidéo, ceci se fait "à l'aveugle".



Figure 7 : Objet Muisca préparé pour la séance de photogrammétrie.

Enfin, comme on peut le voir sur la figure 8, ces objets ne peuvent tenir verticalement sans aide. Afin de leur donner un peu plus de relief, il a fallu les « caler » dans un petit morceau de polystyrène expansé. Un résultat 3D a été obtenu (Figure 8) mais, bien qu'encourageant, il n'est pas totalement satisfaisant. En effet, on constate, par exemple, un grand manque au centre de l'image restituée. Ce « trou » peut avoir plusieurs origines. Il est possible qu'il provienne d'un manque d'images, mais aussi d'un rejet de celles ayant trop de points de corrélations identiques et donc éliminées par le filtre anti-doublons. Comme seule la face supérieure est travaillée alors que le revers est lisse, cela a pu entraîner des erreurs d'interprétation des images. Enfin, un mauvais recouvrement inter bandes peut également intervenir dans ce résultat inabouti.

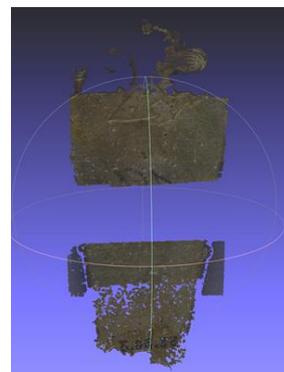
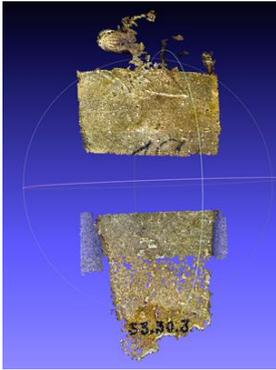


Figure 8.a : Objet Muisca en 3D vue de face



**Figure 8.b** : Objet Muisca en 3D vue de dos

Ces différents exemples ont illustré le couplage de la méthode photogrammétrique avec la proxy photographie, puis avec la macrophotographie et enfin avec l'utilisation de la loupe binoculaire.

Quelles évolutions de ce couplage peut-on envisager?

### 5. Orientations futures

Pour comprendre l'influence du poids du triptyque boîtier – soufflet – optique sur la prise de vue, il faut avoir présent à l'esprit que la lentille frontale de l'optique n'est qu'à quelques millimètres de l'objet. La cinématique de prise de vue, comprenant le relevé du miroir, la fermeture du diaphragme et l'ouverture des rideaux devant le capteur, induit des vibrations. Le tirage optique étant très important et le diaphragme très fermé, la zone de mise au point (ou MAP) est donc relativement faible. Ces vibrations, amplifiées par le poids du triptyque, vont avoir pour effet d'augmenter de la zone de flou autour de la zone de netteté et par conséquent réduire cette dernière.

Il est donc nécessaire de découpler la cinématique de relevé du miroir, de celle de l'ouverture des rideaux devant le capteur. C'est aujourd'hui possible avec des boîtiers de dernière génération où l'on peut introduire un temps de latence, de l'ordre de deux à trois secondes, entre la cinématique du miroir et l'ouverture des rideaux. Celui-ci a pour effet de réduire l'effet des vibrations sur la MAP.

Le poids de l'ensemble boîtier - soufflet - optique n'est pas le seul à prendre en compte. Paradoxalement la taille du capteur est discriminante : à une si faible distance, la MAP va complètement saturer les photosites du capteur de 12MPix alors qu'elle n'en n'activera qu'un tiers pour le capteur de 32MPix, le reste des photosites va donc alimenter le flou. Dans ce cas précis, un capteur de 32MPix est sous utilisé par rapport à un capteur de 12 MPix.

Toujours dans l'idée d'améliorer l'image lors de la prise de vue, on peut être tenté d'utiliser les techniques d'empilement d'images.

En photographie rapprochée, et à fortiori en macrophotographie, la profondeur de champ est très limitée. Centrée sur le point focal, la zone de netteté s'étend de 1/3 avant le point focal et 2/3 après. En

photographie classique, pour augmenter cette zone, il suffit de réduire le diaphragme de l'objectif. En macrophotographie cette technique est exclue car on travaille bien souvent à la plus petite ouverture disponible. L'idée est alors de revenir à un couple vitesse/diaphragme optimal, là où les aberrations chromatiques et les déformations optiques sont minimales. On réalise alors une série de clichés où, en déplaçant la zone de mise au point, du plus rapproché au plus lointain, on « balaye » tout l'objet. Cette série est ensuite traitée soit par Photoshop, soit par des logiciels spécialisés comme Zerene Stacker<sup>2</sup> ou Hélicon focus<sup>3</sup>. Ceux-ci vont composer une nouvelle image en extrayant toutes les zones nettes de chaque cliché. En procédant ainsi, on obtient une image où la zone de mise au point est maximale et correspond à ce que l'on souhaite. Il est donc primordial d'évaluer la MAP que l'on veut pour chaque image. De cette analyse vont découler deux variables fondamentales: le nombre d'images à faire et le choix de la distance focale. Ces deux éléments sont très importants parce qu'ils permettent la répétitivité pour chaque position. La réalisation d'un artefact 3D demande en moyenne 70 images, la méthode d'empilement d'images, multiplie au moins ce nombre par trois. Le temps de post traitement et les risques d'erreurs sont par conséquent augmentés. Des essais ont été réalisés notamment sur le calcul papal, mais les résultats ne sont pas encore à la hauteur des espérances. L'explication de ces résultats perfectibles réside dans la gestion des données EXIF ou IPTC par les logiciels d'empilement d'images. Lorsque l'appareil photo prend une image, il écrit, dans une zone qui lui est réservée de l'image, des données telles que le nom du boîtier, le diaphragme, la vitesse, le nombre de capteurs, etc. Celle-ci est ensuite verrouillée par le créateur de l'image donc ici par le constructeur de l'appareil comme l'indique la norme qui régit ces données IPTC/EXIF.

Lors de l'opération d'empilement, le logiciel récupère toutes les zones nettes des images soumises, et, en les combinant, crée une nouvelle image ignorant de copier les données EXIF/IPTC. Or celles-ci sont essentielles aux logiciels de reconstruction dense qui y trouvent des informations indispensables comme la focale, le diaphragme, la vitesse etc. Néanmoins certains logiciels permettent de rentrer manuellement ces données, mais il semble que la solution est à chercher du côté du logiciel d'empilement.

Enfin une dernière possibilité d'évolution concerne la prise de vue sous binoculaire. Il s'agit d'abord d'améliorer la prise de vue en recherchant le meilleur couple projectif/boîtier en fonction de la loupe binoculaire dont on dispose. Par ailleurs, on s'attachera à définir une méthodologie de prise de vues spécifiques à ce dispositif.

### 6. Conclusion

La photogrammétrie, appliquée à l'archéologie de terrain et, désormais, au monde muséal, éveille, de nos jours, un intérêt grandissant. Comme on a pu le voir tout au long de cet article, il est possible de l'appliquer aux petits

<sup>2</sup> <http://zerenesystems.com/cms/stacker>

<sup>3</sup> <http://www.heliconsoft.com/heliconsoft-products/helicon-focus/>

objets par des ajustements assez simples à mettre en œuvre. En effet l'essentiel des adaptations concerne le versant photographique de la méthode. Toutefois certains matériaux comme les formes cristallines sont encore à l'origine de problèmes techniques. Par ailleurs comment réaliser une prise de vue optimum sous binoculaire en dialoguant avec la personne habilitée à manipuler l'objet ? Comment intégrer les images provenant d'un empilement d'images ? Ce sont ici quelques-uns des enjeux majeurs que pose le couplage entre la macrophotographie et la photogrammétrie.

### Remerciements

Mes remerciements vont au musée du quai Branly-Jacques Chirac et particulièrement à Christophe Mouliherat, chargé d'analyses des collections et référent textile pour la mise à disposition ces objets, Raphaële Héno et Marc Pierrot Deseilligny pour avoir accepté ma présentation orale au cours du congrès de la SFPT « Numérique et perception 3D : les nouvelles conquêtes » en mars 2016 ainsi que les deux relecteurs pour leurs suggestions et commentaires qui ont permis d'améliorer le manuscrit.

### Références

- Anctil M.C., Legendre M, Müller T., 2014, *Recueil de règles de numérisation*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN : 978-2-550-69802-9, p48 et suiv.
- Grussenmeyer P., 2003, *Photogrammétrie architecturale et modélisation 3D du patrimoine*. Revue XYZ N° 95 2e trimestre 2003.
- Grussenmeyer P., 2016, *Photogrammétrie : bilan et perspectives de 150 années d'histoires*. Colloque Photogrammétrie numérique et perception 3D : les nouvelles conquêtes, Marne la Vallée.
- Héno R., Chandelier L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments, Cas des édifices remarquables*. ISTE editions ; ISBN: 978-1-78405-034-4.
- Samaan, M., Héno, R., Pierrot-Deseilligny, M., 2013, *Close-Range photogrammetric tools for small 3D archeological objects*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, 2013 XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France.
- Yanagi, H., Chikatsu, H., 2010, *3D modeling of small objects using macrolens in digital very close range photogrammetry*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.



Figure 9.a: Objet Muisca (vue de face)



Figure 9.b: Objet Muisca (vue de dos)



Figure 9.c: Objet Muisca (vue de dessus)