Photogrammétrie rapprochée, morphométrie géométrique et archéozoologie : une combinaison d'avenir ?

Allowen Evin[1,2], Maxime Pelletier[3], Anaïs Dortel[1], Julie Daujat[4]

[1] Institut des sciences de l'évolution, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE ; 2, place Eugène-Bataillon 34095 Montpellier Cedex 05, France.

[2] Department of Archaeology, Classics and Egyptology, University of Liverpool, 12-14 Abercromby Square, Liverpool L69 7WZ, UK.

[3] Université Aix-Marseille, CNRS, ministère de la Culture, LAMPEA, Aix-en-Provence, France.

[4] Department of Classics and Archaeology, University of Nottingham, UK.

Introduction

À la croisée de l'archéologie et de la zoologie, l'archéozoologie s'intéresse aux restes fauniques (*e.g.* os, dents, bois/cornes, poils, griffes/sabots, etc.) dans le but d'étudier les relations passées entre les sociétés humaines et les populations animales (*e.g.* Chaix et Méniel 2001 ; Arbogast et al. 2005 ; Binford 1981 ; Lyman 1994). Les thèmes abordés par l'archéozoologie sont nombreux et incluent, par exemple, l'exploitation des ressources et les régimes alimentaires, les phénomènes de migrations et de translocations animales dans le cadre de déplacements de populations humaines ou d'échanges commerciaux, ou encore le processus de domestication.

La discipline n'a cessé d'évoluer grâce aux avancées technologiques, notamment numériques, qui permettent d'étudier toujours plus en détails les restes archéozoologiques.

Parmi les méthodes employées, la morphométrie (de *morphê* la forme et *metron* la mesure) correspond aux méthodes utilisées pour la description et la quantification de la variation morphologique des objets. Entre les années 1980/1990, s'est développé la morphométrie dite « géométrique » (Rohlf et Marcus 1993) qui a révolutionné les études morphométriques en se basant non plus sur des mesures de distance, d'angle ou de ratio comme la morphométrie dite « traditionnelle » (Marcus 1990), mais sur des

coordonnées de points. Ces approches, qui permettent une meilleure quantification et visualisation des différences morphologiques que les approches traditionnelles, sont maintenant utilisées de plus en plus fréquemment en archéozoologie (Cucchi et al. 2015). Ces analyses peuvent être menées soit en deux dimensions (2D), généralement à partir de photographies, ou en trois dimensions (3D), directement sur le spécimen avec des systèmes de mesures 3D (*e.g.* MicroScribe : `http://www.3d-microscribe.com/`) ou bien à partir de modèles numériques obtenus par exemple à l'aide de scanners. Les approches 2D, plus rapide et moins couteuses en équipement et en temps sont particulièrement adaptées au surfaces planes (*e.g.* ailes d'insectes, mandibules) alors que les approches 3D seront préférées pour l'étude des structures géométriquement plus complexes telles que, par exemple, les crânes ou les extrémités des os longs.

Le développement des outils informatiques a permis notamment la généralisation de la modélisation tridimensionnelle, qui permet l'obtention de modèles numériques en 3D. Bien que ceux-ci soient majoritairement utilisés dans le jeu vidéo ou le cinéma d'animation, ils peuvent aussi être utilisés à des fins scientifiques, lorsque les modèles obtenus traduisent le plus fidèlement possible la géométrie, la couleur et la texture des objets étudiés. De nombreuses méthodes de reconstruction de modèles 3D d'objets existent tels que l'utilisation de scanners surfaciques, la tomodensitométrie, le rayonnement synchrotron ou encore la photogrammétrie. Ces méthodes sont en constantes évolutions que ce soit en termes de précision (*e.g.* qualité de la reconstruction) ou de performance (*e.g.* rapidité d'exécution).

La photogrammétrie, qui nous intéresse ici, est définit comme la « Science et art dont le sujet d'étude est la photographie dans l'intention de recueillir des données conduisant à des restitutions dimensionnelles et de déterminer la forme et la position d'un objet dans l'espace » (Conseil international de la langue française 1997). Autrement dit, le principe de cette méthode est d'acquérir des images d'une scène ou d'un objet prises selon des points de vue différents, afin de réaliser des mesures de dimensions ou de volume. Une des applications de la photogrammétrie est la réalisation de modèles 3D qui sont des copies numériques de l'objet réel, réalisées sans contact direct avec ce dernier et de manière totalement non destructive.

Les débuts de la photogrammétrie datent de la fin du XIX^{e} siècle avec la première application d'un relevé photogrammétrique datant de 1849 sur la façade de l'hôtel des Invalides à Paris, par le scientifique français Aimé Laussedat (1819-1907). Il existe plusieurs types de relevés photogrammétriques définis en fonction de la position et de la distance à l'objet : la photogrammétrie satellite (à partir d'images satellites), la photogrammétrie aérienne (à partir de photos aériennes obtenues *e.g.* d'avion, ballons captifs, drones, etc.), la photogrammétrie terrestre (à partir de photos obtenus d'un point fixe au sol), la photogrammétrie rapprochée, dont on va parler ici, lorsqu'un objet est photographié à une distance maximale de quelques centaines de mètres, et enfin, la photogrammétrie Macro (à partir d'images obtenues au microscope) (Luhmann et al. 2011). Il existe cependant de nombreuses autres catégories possibles pour décrire les analyses photogrammétriques en fonction par exemple du nombre de photographies utilisées (1, 2, $>$2), des méthodes d'acquisition et de reconstruction em-

ployées (*e.g.* analogiques/digitales) ou des applications (*e.g.* architecture, industrie, etc.) (Luhmann et al. 2011).

Les progrès récents de l'informatique et des technologies numériques ont permis de révolutionner la photogrammétrie et de la rendre accessible au plus grand nombre avec un minimum d'équipement. Il est maintenant possible de réaliser des modèles 3D avec un simple Smartphone, et même d'en commander une impression 3D *via* internet. Si la qualité de la reconstruction n'est pas toujours suffisante pour répondre aux exigences scientifiques, de telles possibilités attestent d'une large vulgarisation de ces approches. En archéologie, la photogrammétrie est aujourd'hui communément utilisée pour reconstruire des modèles numériques de terrain (*e.g.* Discamps et al. 2016 ; Falkingham, Bates et Farlow 2014 ; Grün, Remondino et Zhang 2004), la visualisation de statues ou d'objets (*e.g.* Barreau et al. 2014 ; Kersten et Lindstaedt 2012 ; Koutsoudis, Vidmar et Arnaoutoglou 2013 ; Porter, Roussel et Soressi 2016 ; Sumner et Riddle 2008), et plus récemment la réalisation de modèles 3D d'éléments squelettiques (crânes, dents, os longs, etc.).

Les avantages de l'utilisation de modèles 3D en archéozoologie sont nombreux, en particulier ceux liés à l'accès aux collections. Dans ce cas, les modèles 3D constituent des archives numériques qui peuvent être facilement partagés entre utilisateurs. En outre, ils offrent la possibilité de réaliser des observations ou mesures sur ces mêmes modèles à des fins d'études scientifiques. Il existe maintenant des sites internet visant à rendre disponibles librement les modèles 3D utilisés dans les articles scientifiques (*e.g.* MorphoMuseum : `http://morphomuseum.com/`).

Dans le cadre d'études morphométriques, le modèle 3D doit correspondre le plus fidèlement possible à l'objet réel étudié, en particulier en terme de géométrie. Plusieurs études ont démontré la possibilité d'obtenir des modèles 3D à partir des approches de photogrammétrie respectant la géométrie des objets (*e.g.* Evin et al. 2016 ; Friess 2012 ; Fau, Cornette et Houssaye 2016 ; Muñoz-Muñoz, Quinto-Sánchez et González-José 2016). La photogrammétrie constitue une alternative efficace aux scanners surfaciques traditionnels, qui a en outre l'avantage d'être peu coûteuse, facile à transporter et à mettre en œuvre (*e.g.* Falkingham 2012). Avec un minimum d'équipement (un appareil photo), il est donc possible d'obtenir des modèles 3D fiables pour la réalisation d'études morphométriques. Les projets de recherche combinant à la fois la photogrammétrie et les études morphométriques, pour répondre à des questions d'archéozoologie, sont encore peu nombreux et peu son publiés (*e.g.* Arriaza et al. 2017 ; Yravedra et al. 2017). Cependant, plusieurs études en cours permettent de mieux appréhender différents protocoles possibles, adaptés à divers types de restes osseux (voir plus loin).

1 Présentation générale de la photogrammétrie

La construction de modèles 3D en photogrammétrie repose sur une série d'étapes (Figure 1) que de nombreux tutoriels et sites internet expliquent en détails (*e.g.* `https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_5_en.pdf`).

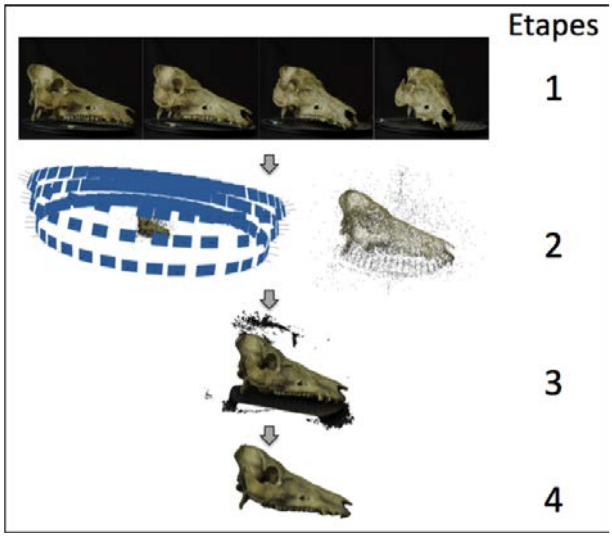


FIGURE 1 – Etapes de la reconstruction de modèles 3D par photogrammétrie. Ici réalisées avec le logiciel Agisoft Metashape `http://www.agisoft.com`. (1) prise de photographies ; (2) alignement des photos et acquisition d'un premier nuage de points ; (3) densification du nuage de points ; (4) maillage et finalisation du modèle (texture, mise à l'échelle).

1.1 Acquisition des photographies

Si, en théorie, il n'est pas indispensable d'avoir de bonnes connaissances en photographie pour réaliser des photos utilisables en photogrammétrie, la connaissance de plusieurs notions de base peuvent permettre d'améliorer les photos et par la même les modèles 3D. Trois paramètres interdépendants sont particulièrement important et concernent l'exposition de la photo : le temps de pose ou vitesse d'obturation qui permet de contrôler la durée pendant laquelle la lumière va atteindre le capteur de l'appareil, le diamètre d'ouverture du diaphragme de l'appareil qui va faire varier la profondeur de champ (zone de netteté), et la sensibilité (les ISO) qui correspond à la capacité du capteur à enregistrer plus ou moins la lumière.

Ces trois paramètres ont des effets sur la luminosité, la netteté de l'image et le bruit et vont être fortement influencés par l'appareil photographique et l'objectif utilisés, l'objet photographié et l'environnement de travail. Il est donc difficile de proposer des règles strictes à appliquer.

Les photographies peuvent être prises avec n'importe quel appareil photo numérique ayant de préférence une résolution d'au moins 5 Méga pixels. Les objectifs grands angles ou *fisheye* doivent être évités, tout comme les zooms, au profit d'une distance focale fixe de $\sim$ 50 mm. Les ISO doivent être réglés sur des valeurs basses, l'ouverture sur des valeurs hautes et la vitesse d'obturation ne doit pas être trop lente pour ne pas entrainer de flou. Les formats de l'image préférés sont souvent le RAW ou le TIFF, mais de nombreux logiciels utilisent aussi les JPG, format compressé mais qui a l'avantage d'être lu par un plus grand nombre de logiciels de visualisation ou de traitement d'images.

En théorie, ces photographies peuvent être réalisées à main levée, sans protocole standardisé, du moment qu'un nombre suffisant de photographies soit pris, pour couvrir la totalité de l'objet étudié. Cependant, si plusieurs objets du même type sont photographiés, il sera plus intéressant d'établir un protocole standardisé d'acquisition des photos (voir plus loin).

Tout type d'objet peut être photographié, mais ceux brillants, de texture (arrangement spatial de couleurs ou d'intensités) homogène (*e.g.* surface trop lisse sans aspérités), réfléchissants ou transparents seront particulièrement difficile à modéliser. Deux grandes approches peuvent être utilisés pour acquérir les photos : 1/ soit le photographe tourne autour de l'objet, et dans ce cas, il faudra veiller à disposer d'assez d'espace pour pouvoir se déplacer librement autour de celui-ci, à la foi au sol et en hauteur, et à ne pas déplacer l'objet au cours de la capture ; 2/ soit le photographe reste fixe et c'est l'objet qui doit être pivoté sur lui-même, soit de manière manuelle, soit de manière automatisée (voir plus loin). Pour de petits objets, la seconde approche sera privilégiée pour sa plus grande rapidité d'exécution, et sa plus grande facilité de mise en œuvre. Dans ce cas, il faudra utiliser un arrière-plan uni non réfléchissant et sans aspérités.

La photogrammétrie repose sur la reconnaissance de points homologues entre plusieurs images. Un point de l'objet va pouvoir être reconstruit s'il est visible sur au moins deux photos (ou plus en fonction des logiciels et paramètres de reconstruction). Ainsi, il faut bien veiller à ce que toutes les parties de l'objet soient photographiées. En outre, plus un objet sera complexe plus il nécessitera un nombre élevé de photographies pour obtenir un modèle complet.

Afin de pouvoir faire des mesures sur le modèle, il sera indispensable d'inclure une échelle photographique à côté de l'objet à photographier.

Certains logiciels (comme Metashape) permettent de vérifier la qualité des images avant la reconstruction, ce qui peut permettre de gagner beaucoup de temps pour les étapes suivantes. En effet, une grande qualité d'image est très importante pour la reconstruction du modèle, au risque que celui-ci soit incomplet ou de mauvaise qualité.

Une liste du matériel permettant de réaliser des photographies pour la reconstruction d'un modèle 3D par photogrammétrie est présentée Tableau 1.

1.2 Alignement des photographies et obtention d'un premier nuage de points (*sparse cloud*)

Au cours de cette étape, le logiciel va calculer la position et l'orientation de l'appareil photo au moment de la prise de chaque photo, et va construire un premier nuage de points dit « clairsemé » (« *sparse cloud* » en anglais). Il est alors possible d'inspecter la qualité de l'alignement, et d'éliminer les photos mal positionnées et éventuellement de les réaligner sur les photos conservées. Il est aussi possible d'inspecter les correspondances entre les photos prises deux à deux (Figure 2). Si lors de l'alignement le logiciel reconstruit préférentiellement le fond et non l'objet, il est possible d'enlever ce fond soit sur chacune des photos à l'aide d'un logiciel d'image (*e.g.* Photoshop

Tableau 1 – Liste du matériel permettant de réaliser des photographies dans le but de reconstruire un modèle 3D par photogrammétrie. La nécessité de l'outil est classé : '+++' indispensable ; '++' recommandé ; '.' non indispensable mais utile.

Matériel	Nécessité	Commentaire
Appareil photo + objectif	+++	L'élément le plus important, il faudra veiller en particulier à l'objectif utilisé (voir texte).
Échelle	+++	Indispensable si l'on veut faire des mesures sur le modèle.
Ordinateur relativement puissant	+++	Plus l'ordinateur sera puissant (en terme de RAM, CPU et GPU) moins le temps de reconstruction des modèles sera long.
Logiciel de photogrammétrie	++	Un vaste choix existe, certains sites internet proposent de réaliser des reconstructions de modèles en ligne. Attention, toutefois dans ce cas, il est possible que les droits du modèle n'appartiennent pas à l'utilisateur mais à la société qui détient l'application (*e.g.* 123D *catch online*).
Bras ou trépied	++	Le support d'appareil photo va apporter de la stabilité, mais il est également possible de travailler à main levée.
Plaque tournante	++	Elle peut être manuelle, tournant en continue ou contrôlée et synchronisée avec la prise de photo (détails dans le *Supplementary Material* d'Evin *et al.*, 2016).
Fond uni non réfléchissant	.	Non indispensable, il est souvent possible de trouver un mur uni devant lequel travailler.
Câble permettant de connecter l'appareil photo à l'ordinateur ainsi qu'un logiciel de contrôle de l'appareil photo (*tethered shooting*)	.	Non indispensable, mais permet de gagner du temps pour le transfert et l'organisation des photos.
Alimentation d'appareil photo ou plusieurs batteries	.	Non indispensable, mais facilite grandement les longues sessions de travail.

qui a l'avantage de permettre de faire des traitements par lot), soit certains logiciels (*e.g.* Metashape) permettent d'importer un fond qui sera soustrait à toutes les images avant l'alignement.

1.3 Densification du nuage de points et construction d'un nuage dense (*dense cloud*)

À partir de l'alignement précédemment obtenu, un nuage de points dense est calculé par le logiciel. Cette étape est généralement la plus longue du processus de reconstruction 3D d'un objet. Selon le nombre de photos, de la taille de celles-ci, de la puissance de l'ordinateur et/ou la qualité du modèle final recherchée, cela peut durer de quelques minutes à plusieurs heures.

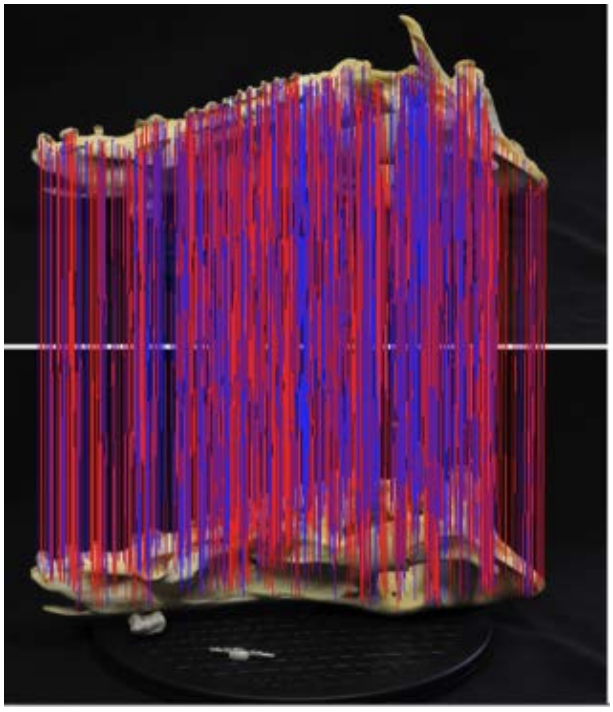


Figure 2 – Correspondance entre deux photos d'un crâne de sanglier (Metashape).

1.4 Réalisation d'un maillage (*mesh*)

Les points sont reliés afin de créer des polygones et donc un modèle 3D. Il sera par la suite possible de mettre le modèle à l'échelle et d'ajouter une texture, c'est-à-dire d'appliquer à la surface du maillage tridimensionnel la/les couleur(s) de l'objet original de telle sorte que l'objet 3D reproduise le plus fidèlement possible l'apparence de l'objet réel. L'étape de mise à l'échelle est indispensable si le but de l'acquisition des modèles est de réaliser des études morphométriques.

Ces quatre étapes permettent d'obtenir un modèle 3D et constituent la base des reconstructions photogrammétriques. Certains logiciels permettent de réaliser de manière automatique et en série ces étapes (*batch process*), ce qui peut être un gain de temps considérable lors de la reconstruction d'une série de modèles. Les modèles 3D obtenus peuvent ensuite être exportés. De nombreux formats existent, les plus courant étant certainement STL et PLY. De nombreux logiciels permettant de visualiser et manipuler les objets 3D sont disponibles, parmi lesquels les logiciels gratuits MeshLab (`http://www.meshlab.net/`) et MorphoDig (`https://morphomuseum.com/morphodig`).

Il existe un grand nombre de logiciels de photogrammétrie, qui présentent tous des spécificités différentes. Une liste est disponible à l'adresse suivante : `https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison\_of\_photogrammetry\_software`. Le logiciel le plus communément utilisé actuellement semble être Agisoft© Metashape (`http://`

www.agisoft.com/), comme en témoigne le nombre important de tutoriels en ligne, ainsi qu'une communauté d'utilisateurs très active. Ce logiciel est payant (les licences Education sont de l'ordre de $\sim$ 460 euros pour la version Professionnelle et $\sim$ 50 euros pour la version Standard), mais particulièrement facile d'utilisation tout en fournissant des résultats de bonne qualité (*e.g.* Fau, Cornette et Houssaye 2016).

2 Cas d'étude

Trois études portant sur différents taxons et différents os vont être détaillées ici, afin de présenter un panel de protocoles d'acquisition des modèles 3D à des fins d'étude morphométrique en archéozoologie. Ces trois études ont pour objectifs de combiner photogrammétrie rapprochée et morphométrie géométrique. Elles portent sur les crânes de mammifères (Cas N°1), l'humérus et le talus de daim (Cas N°2) et sur le calcanéus, l'humérus, le coxal et le tibia de lièvres et lapins (Cas N°3) (Figure 3).

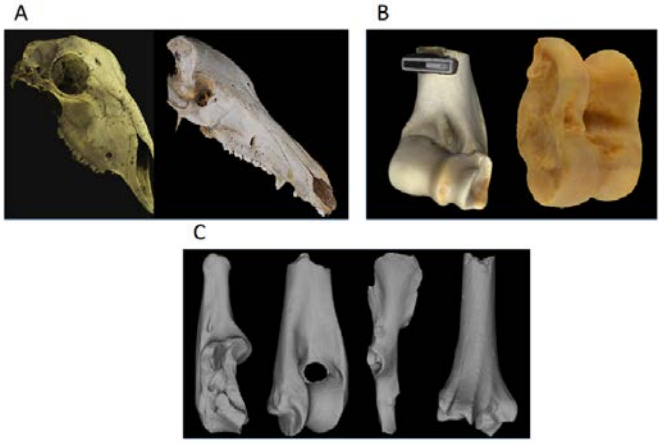


Figure 3 – Illustration des modèles. A : un crâne de mouton, *Ovis aries* (gauche) et de sanglier, *Sus scrofa* (droite). B : un humérus (gauche) et un talus (droite) de daim, *Dama dama dama*. C, de gauche à droite : un calcanéus, un humérus, un os coxal et un tibia de lièvre variable, *Lepus timidus*. Les modèles ne sont pas à l'échelle.

2.1 Cas N°1 : Étude des changements morphologiques associés à la domestication en comparant les conformations crâniennes des formes sauvages et domestiques de différents mammifères (A. Evin et A. Dortel [Dortel, 2017])

Les modèles 3D des crânes (Figure 2) sont obtenus à partir d'un reflex Nikon D90 couplé à un objectif 60 mm (AF-S Micro NIKKOR 60 mm), monté sur bras (Manfrotto 244RC). Les spécimens sont positionnés sur une plaque tournante non électrique (type plaque TV tournante à 360°) ou sur une plaque électrique tournant en continu (type bijouterie). L'appareil photo est connecté à un ordinateur et commandé à l'aide du logiciel DCamCapture (version 0.9.7.0, de nombreuses alternatives gratuites sont dis-

ponibles) qui permet de prendre des photos toutes les 2 secondes, de les stocker et de les renommer directement sur l'ordinateur.

Il n'est pas possible de prendre des photos tout autour d'un crâne sans modifier sa position. De fait, l'acquisition des photos se fait en deux temps, 108 photos sont prises pour reconstruire la face ventrale du crâne, puis celui-ci est retourné et 108 photos sont prises pour la face dorsale (soit un total de 216 photos par crâne). Pour chaque face, les photos sont prises en suivant le protocole détaillé dans (Evin et al. 2016) : une photo est prise tous les 10° (soit 36 pour couvrir les 360°) selon trois angles (inclinaisons) différents (environ 0°, 15° et 40°). Le crâne à photographier est posé sur un plateau tournant électrique (tournant en continu), lequel est placé devant un fond noir uni, constitué d'un tissu tendu non réfléchissant. Le spécimen est éclairé, si besoin, à l'aide d'une lampe de bureau placée dans l'alignement de l'appareil photo afin de réduire les ombres portées. La mise au point est faite manuellement au niveau de l'orbite du crâne et les réglages de l'appareil sont modifiés de manière à obtenir des clichés nets malgré le mouvement du support. L'acquisition d'un modèle complet de crâne a nécessité neuf étapes : les étapes 1 à 4 décrites précédemment (Figure 1), réalisées séparément pour les faces ventrales et dorsales du crâne. Ensuite, un masque est édité à partir de chaque hémi-modèle afin de ne conserver que la partie du modèle comprenant le crâne, en supprimant le support (ici la plaque tournante). Les 216 photos masquées sont ensuite combinées et réalignées toutes ensemble, et les étapes de densification du nuage de points et de maillage sont également effectuées. Le modèle 3D ainsi obtenu est ensuite texturé et mis à l'échelle.

2.2 Cas N°2 : Étude des changements morphologiques du daim d'Europe (*Dama dama dama*) et du daim de Mésopotamie (*D. d. mesopotamica*) en Eurasie occidentale associés à leur relation complexe avec l'Homme (J. Daujat)

Cette étude se base sur la reconstruction des modèles 3D du talus ($\sim$ 5 cm) et de l'extrémité distale de l'humérus ($\sim$ 18-24 cm) (Figure 3B). Les photographies sont réalisées à l'aide d'un reflex Nikon D5200 couplé à un objectif macro 60 mm (Nikon AF-S Micro NIKKOR 60 mm f/2.8G ED), monté sur bras (Manfrotto 244RC). Les spécimens sont fixés sur une plaque tournante non électrique (type plaque TV tournante à 360°) à l'aide d'un petit fourreau en mousse pour le talus et dans un pot pour l'humérus (Figure 4B). La plaque tournante est recouverte d'un motif coloré qui contient une graduation tous les 10°, un quadrillage qui fournit l'échelle et un patron coloré facilitant l'alignement des photos (le fond est téléchargeable librement sur le blog de S. T. Porter : `http://www.stporter.com/resources/`). Les photos sont réalisées avec uniquement l'éclairage ambiant (naturel et/ou artificiel de la pièce) sans lumière directe additionnelle. L'appareil photo est connecté à un ordinateur et commandé à l'aide du logiciel Sofortbild version 1.5b11 (spécifique à Nikon et développé pour Mac uniquement). Ce logiciel permet d'automatiser la prise de photos toutes les 2 secondes, de les renommer et de les stocker directement sur l'ordinateur.

Pour le talus, 144 photos sont prises par os, dont 72 couvrent la partie dorsale et 72 la partie ventrale. Les photos sont prises selon un protocole similaire à celui détaillé dans (Evin et al. 2016) avec une photo prise tous les 10° selon deux angles d'inclinai-

son : $\sim 6°$ pour le premier et un deuxième angle impérativement égal ou légèrement supérieur à 25°. La mise au point est manuelle et faite au milieu du talus.

Pour l'humérus, seule la partie distale est étudiée. L'os est positionné, partie distale vers le haut et immergé à moitié, dans un pot contenant des haricots (Figure 4B ; du riz, des perles ou du sable peuvent également convenir). Pour chaque humérus, 108 photos sont prises selon trois angles (-35°, 0° et 25°). La mise au point, manuelle, est faite au milieu de la partie distale de l'os pour l'angle -35° et 0°, et légèrement au-delà du milieu (en profondeur de champs), pour l'angle à 25°.

L'acquisition d'un modèle complet de talus nécessite d'en un premier temps d'obtenir les deux hémi-modèles correspondant aux vues ventrales et dorsales : les étapes 1 à 4 (Figure 1) sont réalisées séparément pour chaque face. Les masques correspondant aux deux hémi-modèles sont ensuite obtenus, les deux hémi-modèles combinés et les étapes 2 à 4 sont alors réalisées sur l'ensemble des photographies masquées.

Pour l'humérus, pour lequel uniquement la partie distale est étudiée, les étapes 2 à 4 sont directement réalisées sur l'ensemble des photographies.

2.3 Cas N°3 : Étude des changements morphologiques des différentes populations de lapin (genre *Oryctolagus*) et de lièvre (genre *Lepus*) sur le pourtour méditerranéen durant le Pléistocène (M. Pelletier)

Cette étude porte sur quatre os : le calcanéus (1,5-4 cm de long), l'humérus ($\sim$ 5-7 cm), l'os coxal ($\sim$ 6-9 cm), et le tibia ($\sim$ 7-20 cm) (Figure 3C). Les photographies ont été réalisées à partir d'un reflex Canon EOS 70D couplé à un objectif macro 100 mm (Canon EF 100 mm f/2.8 L IS USM Macro), d'un trépied photo (Walimex FW-3970), d'une télécommande (Canon RS-60E3) et d'un plateau tournant de fabrication artisanale en contreplaqué (Figure 4C). Les prises de vue, ainsi que le stockage informatique des images, sont effectués manuellement. Les objets sont positionnés au centre d'un mini studio photo de couleur uni bleu non réfléchissant (Figure 4C). L'éclairage utilisé est fixe à l'aide de quatre mini-torches au socle aimanté (XanLite LP1072, 23 LED). Les objets sont positionnés verticalement au centre du plateau tournant à l'aide d'une gomme tackante, où figure également du papier millimétré facilitant l'étape de mise à l'échelle. Ici, le système d'éclairage et le fond uni permettent entre autre de standardiser le protocole de prise de vue, peu importe le lieu de réalisation. Ici, les réglages ont été fixés en fonction de ce protocole adapté aux très petits objets, ainsi qu'avec un objectif macro permettant une bonne définition des images. Pour chaque os, 60 photos sont réalisées en trois étapes : 20 photos prisent perpendiculairement à l'objet (vue de face) correspondant à une photo prise tous les 18° ; 20 photos selon un angle d'inclinaison d'environ 20° ; puis enfin 20 photos selon le même angle d'inclinaison après avoir tourné verticalement l'objet de 180° afin de reconstituer les extrémités proximales et distales.

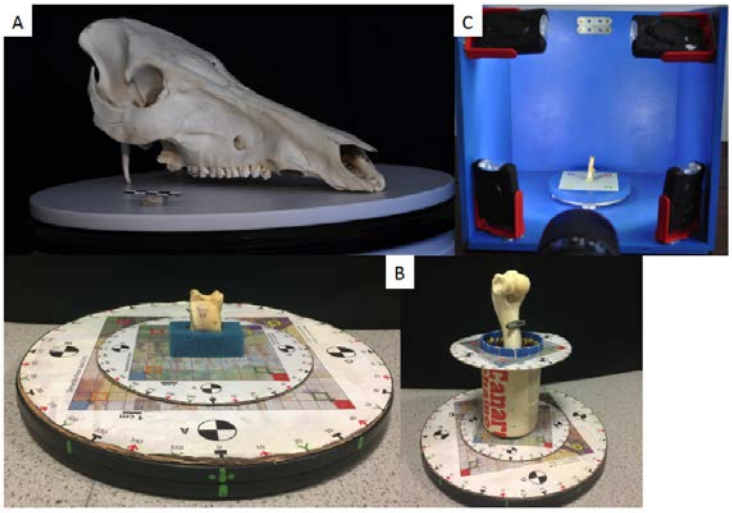


FIGURE 4 – Systèmes de prises de photographies pour (A) les crânes de mammifères (sanglier), (B) le talus (à gauche) et l'humérus (à droite) de daims et (C) le calcanéus, l'humérus, l'os coxal et le tibia de lapins/lièvres.

3 Acquisition et traitement de données morphométriques à partir de modèles 3D

Une fois les modèles obtenus et mis à l'échelle, il est possible de réaliser des mesures traditionnelles, telles que des angles ou des distances, mais également d'appliquer des approches de morphométrie géométrique. Pour ce faire, les coordonnées de points (en 3D : x, y et z) doivent être collectés sur les modèles. Ces points peuvent correspondre à des points repères homologues (*landmarks*), des points le long de courbes appelés points glissants (*sliding semi-landmarks*) ou de contours (*outlines*), ou encore des points glissants positionnés sur des surfaces. La morphométrie géométrique permet d'étudier en détail les variations de taille et de conformations. Les conformations, proportions des différentes parties d'un objet, est l'information géométrique indépendante des effets de localisation, d'orientation et d'échelle (Kendall 1977).

Il existe peu d'article en français détaillant les approches de morphométrie géométrique, parmi lesquels on peut noter (Baylac 1996) et plus récemment (Cucchi et al. 2015), spécifiquement dédiés aux concepts, méthodes et applications de la morphométrie géométrique en archéozoologie. En anglais, les références sont nombreuses, mais on peut noter le livre *Geometric Morphometrics for Biologists*: *A Primer* (Zelditch et al. 2004) et le volume spécial *Virtual Morphology and Evolutionary Morphometrics in the New Millenium* de la revue *Hystrix* (Cardini et Loy 2013).

Certains logiciels de photogrammétrie intègre la possibilité de récupérer les coordonnées de points (comme Metashape édition professionnelle), mais il existe des logiciels dédiés à la manipulation de modèles 3D comme MeshLab (`http://www.meshlab.`

net/), MeshTool (http://morphomuseum.com/meshtools), ou Avizo Standard Edition 7.1 (http://www.vsg3d.com/).

Une fois les coordonnées acquises, celles-ci vont pouvoir être analysées grâce à des logiciels dédiés aux analyses de morphométrie géométrique tels que MorphoJ (http://www.flywings.org.uk/morphoj_page.htm), soit *via* le langage R (https://cran.r-project.org) qui offre la plus grande étendue d'analyses possibles. Plusieurs librairies dédiées aux analyses de morphométrie géométrique sont disponibles parmi lesquelles Geomorph (Adams et Otárola-Castillo 2013), Shape (Soetaert 2015), Momocs (Bonhomme et Claude 2014) et Morpho (Schlager 2017). Le livre *Morphometrics with R* (Claude 2008) contient également toutes les bases afin d'utiliser le language R pour les analyses de morphométrie géométrique. Le site internet http://life.bio.sunysb.edu/morph/ contient également un grand nombre de ressources pour les approches en morphométrie géométrique (glossaire, logiciels, tutoriels, etc.).

4 Avantages et limites de la photogrammétrie pour les études archéozoologiques

Tout comme les autres techniques d'acquisition de modèles 3D (*e.g.* scanner surfacique), la photogrammétrie permet de disposer d'archives numériques des objets étudiés. Il n'est donc plus nécessaire de se rendre physiquement dans les collections pour réaliser une grande diversité d'études.

La photogrammétrie dispose en outre de nombreux avantages par rapport aux scanners surfaciques :

- Dans sa mise en œuvre la plus simple, la photogrammétrie ne nécessite pas plus qu'un appareil photo, maintenant devenu un équipement incontournable de laboratoire, et même dans sa mise en œuvre plus sophistiqué, le matériel nécessaire reste peu lourd et peu encombrant (Table 1), et donc particulièrement transportable.
- Un autre avantage du matériel utilisé est qu'il est facilement remplaçable puisque l'outil de base de la photogrammétrie est un appareil photo.
- En outre, le matériel utilisé est relativement peu coûteux en comparaison de beaucoup de scanners surfaciques.
- Il est également possible de travailler sans électricité (au moins pour un certain temps), ce qui peut être utile dans certaines collections archéologiques, ou sur le terrain.
- Le temps d'acquisition des photographies peut être relativement court, de quelques minutes pour une extrémité d'os long au quart d'heure pour une structure plus complexe comme un crâne, ce qui limite le temps passé dans les collections ou à l'inverse permet l'étude d'un plus grand nombre de spécimens quand le temps passé dans les collections est limité.
- Au niveau des objets étudiés, la photogrammétrie a l'avantage de pouvoir s'adapter à tout type de taille d'objet, du plus grand au plus petit, du moment

que des photos de bonnes qualités et couvrant l'ensemble de l'objet peuvent être obtenues.

- En outre, les objets brillants, comme de l'émail dentaire par exemple, seront plus facilement reconstruits par photogrammétrie que par la plupart des scanners surfaciques.

Quelques limites à la méthode peuvent néanmoins être notées :

- À l'inverse des scanners surfaciques, il ne sera souvent pas possible d'avoir le modèle 3D prêt à être analysé dès la fin de la prise de photographies. La reconstruction du modèle pourra prendre un temps relativement long, de quelques minutes à plusieurs heures en fonction de la complexité de l'objet étudié, de la résolution et du nombre des photos et des capacités de calcul de l'ordinateur utilisé.
- La photogrammétrie, comme les scanners surfaciques, ne permettent que de reconstruire la surface externe des objets, contrairement aux modèles 3D réalisée à partir d'un tomographe à rayons X (*CT-scan*), d'un synchrotron, ou d'un IRM qui permettent aussi d'accéder à la structure interne des objets. Ces approches sont néanmoins souvent beaucoup plus onéreuses et nettement moins transportable que la photogrammétrie.

Au regard des avantages et des limites de la photogrammétrie par rapport aux scanners surfaciques, la photogrammétrie, de par son moindre coût et sa transportabilité, est un outil particulièrement adapté pour les études archéozoologiques.

5 Verrous technologiques et méthodologiques

Les progrès informatiques des dernières décennies ont rendu l'acquisition de modèles 3D particulièrement facile. Cependant, les appareils photos offrent des résolutions toujours plus grandes, rendant les besoins en termes de calcul de plus en plus important. De fait, la reconstruction de modèles 3D par photogrammétrie peut nécessiter plusieurs heures par spécimens. Si ce temps de calcul correspond d'avantage à du temps de machine que du temps humain, des ordinateurs toujours plus puissants sont nécessaires.

L'utilisation combinée de la photogrammétrie et de la morphométrie géométrique est encore très peu répandue en particulier en archéozoologie. De fait, il est souvent nécessaire d'utiliser deux logiciels distincts pour réaliser les différentes étapes, un pour l'acquisition du modèle 3D, le second pour réaliser l'étude morphométrique. Il sera utile à l'avenir de rechercher, soit une meilleure connexion entre les logiciels, soit une intégration des outils de mesures morphométriques aux logiciels de photogrammétrie eux-mêmes. Certains logiciels (*e.g.* Metashape professional edition) intègrent déjà la possibilité de mesurer des coordonnées de points repères et peuvent donc être utilisés dans ce but, à condition que les modèles aient été construits à l'aide de ce même logiciel.

Un des défis des prochaines années reposera sur le partage de données. Dans le cadre d'études de morphométrie géométrique, les données sont le plus souvent partagées,

soit directement sous la forme de coordonnées de points (en 2D ou 3D), soit à partir de données brutes comme des photos ou des modèles 3D (sur lesquels les coordonnées des points peuvent ensuite être mesurées). L'acquisition des photos ou des modèles, ainsi que la prise de mesure, sont deux étapes pouvant potentiellement entrainer des biais (différentes méthodes d'acquisition utilisées ou différents opérateurs). Ces biais sont très rarement testés. En comparant des mesures de points-repères 3D obtenus par un même opérateur sur des modèles de crânes de loups, à l'aide d'un scanner surfacique et par photogrammétrie (Evin et al. 2016), il a été mis en évidence le même degrés d'erreur de mesure entre les deux approches ($\sim$ 2%) avec seulement 6.3 % de la variation totale résultant de la méthode d'acquisition. Une autre étude a comparé des données de coordonnées de points 3D, entre deux scanners laser et la photogrammétrie, sur des crânes de marsupiaux (Fruciano et al. 2017), en prenant en compte plusieurs manipulateurs pour effectuer les mesures. Cette étude a mis en évidence une plus grande variation dans les données entre les opérateurs qu'entre les méthodes d'acquisition des modèles. Ces deux études suggèrent donc, qu'il semble préférable que le partage des données est lieu au niveau des modèles, qu'ils aient été acquis à l'aide de scanner surfacique ou par photogrammétrie, et qu'un seul opérateur réalise les mesures de points repères 3D. Cependant, ces résultats obtenus, uniquement sur des crânes et sur seulement deux jeux de données, devront être complétés afin de confirmer (ou non) leur généralisation. Il sera également important de tester la combinaison de données issues d'autres technologies pour l'acquisition des modèles 3D (*e.g. CT-scan*), et de comparer des mesures réalisées à partir de modèles 3D ou directement sur l'objet à l'aide d'appareils tels qu'un bras de mesure (*e.g.* Microscribe : `http://www.3d-microscribe.com/`).

Conclusion

De par son faible coût et ses facilités de déplacement et de mise en œuvre, la photogrammétrie est certainement en train de devenir LA méthode d'acquisition la plus en vogue pour obtenir des modèles 3D de restes osseux de bonnes qualités, fiables géométriquement et pouvant ensuite être utilisés pour des analyses de morphométrie géométrique. Les modèles obtenus grâce à la photogrammétrie permettent également de disposer d'archives numériques d'objets pouvant être partagés, consultables loin des collections et sans les problèmes liés à la manipulation d'objets fragiles. Ces données informatiques permettent de revenir facilement sur le spécimen, d'observer de nouveaux caractères, qu'ils soient discrets ou continus, biologiques ou d'ordre taphonomique par exemple. Il est également possible d'imprimer ces modèles et de disposer ainsi d'un objet physique manipulable. Les impressions 3D peuvent désormais servir de collection de référence, en particulier pour les espèces pour lesquelles il est difficile de disposer de squelettes (*e.g.* espèces rares ou protégées). La combinaison de la morphométrie géométrique et de la photogrammétrie correspond réellement à une combinaison d'avenir qui devrait se démocratiser rapidement dans les prochaines années.

Références

Adams, Dean C., and Erik Otárola-Castillo. 2013. "Geomorph: An <Scp>R</Scp> Package for the Collection and Analysis of Geometric Morphometric Shape Data." *Methods in Ecology and Evolution* 4 (4): 393–99. doi: 10.1111/2041-210X.12035.

Arbogast, Rose-Marie, Marie-Pierre Horard-Herbin, Patrice Méniel, and Jean-Denis Vigne. 2005. *Animaux, Environnements et Sociétés*. Edité par Marie-Pierre Horard-Herbin and Jean-Denis Vigne, Paris.

Arriaza, Mari Carmen, José Yravedra, Manuel Domínguez-Rodrigo, Miguel Ángel Mate-González, Elena García Vargas, Juan Francisco Palomeque-González, Julia Aramendi, Diego González-Aguilera, and Enrique Baquedano. 2017. "On Applications of Micro-Photogrammetry and Geometric Morphometrics to Studies of Tooth Mark Morphology: The Modern Olduvai Carnivore Site (Tanzania)." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 488 (December): 103–12. doi:10.1016/j.palaeo.2017.01.036.

Barreau, Jean-Baptiste, Théophane Nicolas, G Bruniaux, E Petit, Q Petit, Y Bernard, Ronan Gaugne, and Valérie Gouranton. 2014. "Ceramics Fragments Digitization by Photogrammetry, Reconstructions and Applications." *International Conference on Culturage Heritage. EuroMed, 2014, Nov 2014, Lemessos, Cyprus*, 2–9. http://arxiv.org/abs/1412.1330.

Baylac, Michel. 1996. "Morphométrie Géométrique et Systématique." *Biosystema* 14.

Binford, Lewis R. 1981. *Bones: Ancient Men and Modern Myths*. Edited by Academic Press Inc. New York.

Bonhomme, Vincent, and Julien Claude. 2014. "Momocs : Outline Analysis Using R" 56 (13).

Cardini, Andrea, and Anna Loy. 2013. *Virtual Morphology and Evolutionary Morphometrics in the New Millenium, Hystrix the Italian Journal of Mammalogy, Volume 24*. Rome.

Chaix, Louis, and Patrice Méniel. 2001. *Archéozoologie. Les Animaux et L'archéologie*. Paris: Errance.

Claude, Julien. 2008. *Morphometrics with R*. New York: Springer.

Conseil International de la Langue Française. 1997. *Terminologie de Télédétection et Photogrammétrie*. Conseil In. Paris. http://fr.calameo.com/read/0009039478fa82b8cd21c.

Cucchi, Thomas, Michel Baylac, Allowen Evin, Olivier Bignon-Lau, and Jean-Denis Vigne. 2015. "Morphométrie Géométrique et Archéozoologie : Concepts, Méthodes et Applications." In *Messages D'os: Archéométrie Du Squelette Animal et Humain*, edited by Marie Balasse, Jean-Philip Brugal, Yannicke Dauphin, Eva-Maria Geigl, Christine Oberlin, Ina Reiche, and Messages, éditions des archives contemporaines, 197–216. Paris.

Discamps, Emmanuel, Xavier Muth, Brad Gravina, François Lacrampe-Cuyaubère, Jean Pierre Chadelle, Jean Philippe Faivre, and Bruno Maureille. 2016. "Photogrammetry as a Tool for Integrating Archival Data in Archaeological Fieldwork: Examples from the Middle Palaeolithic Sites of Combe-Grenal, Le Moustier, and Regourdou." *Journal of Archaeological Science: Reports* 8. Elsevier Ltd: 268–76. doi:10.1016/j.jasrep.2016.06.004.

Dortel A. 2017. Mémoire de master 1-CEPAGE, université de Montpellier. Existe-il un syndrome de domestication dans la morphologie crânienne des mammifères? sous la direction de A. Evin.

Evin, Allowen, Thibaud Souter, Ardern Hulme-Beaman, Carly Ameen, Richard Allen, Pietro Viacava, Greger Larson, Thomas Cucchi, and Keith Dobney. 2016. "The Use of Close-Range Photogrammetry in Zooarchaeology: Creating Accurate 3D Models of Wolf Crania to Study Dog Domestication." *Journal of Archaeological Science: Reports* 9. The Authors: 87–93. doi:10.1016/j.jasrep.2016.06.028.

Falkingham, Peter L. 2012. "Acquisition of High Resolution Three-Dimensional Models Using Free, Open-Source, Photogrammetric Software." *Palaeontologia Electronica* 15 (1): 1T:15p.

Falkingham, Peter L., Karl T. Bates, and James O. Farlow. 2014. "Historical Photogrammetry: Bird's Paluxy River Dinosaur Chase Sequence Digitally Reconstructed as It Was prior to Excavation 70 Years Ago." *PLoS ONE* 9 (4): 1–5. doi:10.1371/journal.pone.0093247.

Fau, Marine, Raphaël Cornette, and Alexandra Houssaye. 2016. "Photogrammetry for 3D Digitizing Bones of Mounted Skeletons: Potential and Limits." *Comptes Rendus Palevol* 15 (8). Académie des sciences: 968–77. doi:10.1016/j.crpv.2016.08.003.

Friess, Martin. 2012. "Scratching the Surface? The Use of Surface Scanning in Physical and Paleoanthropology." *Journal of Anthropological Sciences* 90 (January): 7–31. doi:10.4436/jass.90004.

Fruciano, Carmelo, Mélina A. Celik, Kaylene Butler, Tom Dooley, Vera Weisbecker, and Matthew J. Phillips. 2017. "Sharing Is Caring? Measurement Error and the Issues Arising from Combining 3D Morphometric Datasets." *Ecology and Evolution*, no. June: 1–13. doi:10.1002/ece3.3256.

Grün, Armin, Fabio Remondino, and L. I. Zhang. 2004. "Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan." *Photogrammetric Record* 19 (107): 177–99. doi:10.1111/j.0031-868X.2004. 00278.x.

Kendall, D. G. 1977. "The Diffusion of Shape." *Advances in Applied Probability* 9 (3): 428. doi:10.2307/1426091.

Kersten, Thomas P., and Maren Lindstaedt. 2012. "Image-Based Low-Cost Systems for Automatic 3D Recording and Modelling of Archaeological Finds and Objects." *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 7616 LNCS: 1–10. doi:10.1007/978-3-642-34234-9_1.

Koutsoudis, Anestis, Blaž Vidmar, and Fotis Arnaoutoglou. 2013. "Performance Evaluation of a Multi-Image 3D Reconstruction Software on a Low-Feature Artefact." *Journal of Archaeological Science* 40 (12): 4450–56. doi:10.1016/j.jas.2013.07.007.

Luhmann, T., S. Robson, S. Kyle, and I. Harley. 2011. *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*. Edited by Whittles Publishing. Dunbeath. http://trid.trb.org/view.aspx?id=814766.

Lyman, R. Lee. 1994. *Vertebrate Taphonomy (Cambridge Manuals in Archaeology)*. Edited by Cambridge University Press. Cambridge.

Marcus, L. F. 1990. "Traditional Morphometrics." *Proceedings of the Michigan Morphometrics Workshop* 2: 77–122.

Muñoz-Muñoz, Francesc, Mirsha Quinto-Sánchez, and Rolando González-José. 2016. "Photogrammetry: A Useful Tool for Three-Dimensional Morphometric Analysis of Small Mammals." *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research* 54 (4): 318–25. doi:10.1111/jzs.12137.

Porter, Samantha Thi, Morgan Roussel, and Marie Soressi. 2016. "A Simple Photogrammetry Rig for the Reliable Creation of 3D Artifact Models in the Field Lithic Examples from the Early Upper Paleolithic Sequence of Les Cottés (France)." *Advances in Archaeological Practice* 4 (1): 71–86. doi:10.7183/2326-3768.4.1.71.

Rohlf, James F., and Leslie F. L.F. Marcus. 1993. "A Revolution in Morphometrics." *Trends in Ecology & Evolution* 8 (4). Elsevier: 129–32. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016953479390024J.

Schlager, Stefan. 2017. "Morpho and Rvcg -- Shape Analysis in {R}." In *Statistical Shape and Deformation Analysis*, edited by Guoyan Zheng, Shuo Li, and Gabor Szekely, 217–56. Academic Press.

Slice, Dennis, Fred L. Bookstein, Leslie F. Marcus, and James F. Rohlf. 1996. "A Glossary of Geometric Morphometrics." In *Advances in Morphometrics*, edited by Plenum Press, NATO ASI S, 284: 531D551. New York.

Soetaert, Karline. 2015. "Package 'Shape'". *Version 1.4.2*.

Sumner, T. Alexandra, and Andrew T. R. Riddle. 2008. "A Virtual Paleolithic: Assays in Photogrammetric Three-Dimensional Artifact Modelling." *PaleoAnthropology*, 158–69.

Yravedra, José, Elena García-Vargas, Miguel Ángel Maté-González, Julia Aramendi, Juan Francisco Palomeque-González, Javier Vallés-Iriso, Jorge Matesanz-Vicente, Diego González-Aguilera, and Manuel Domínguez-Rodrigo. 2017. "The Use of Micro-Photogrammetry and Geometric Morphometrics for Identifying Carnivore Agency in Bone Assemblages." *Journal of Archaeological Science: Reports* 14 (January). Elsevier: 106–15. doi:10.1016/j.jasrep.2017.05.043.

Zelditch, M, Donald L. Swiderski, H David Sheets, and William L. Fink. 2004. *Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer*. San Diego, London: Elsevier Academic Press. http://books.google.com/books?hl=en\&lr=\&id=LKCVAGn8vkoC\&oi=fnd\&pg=PP1\&dq=GEOMETRIC+MORPHOMETRICS+FOR+BIOLOGISTS+:+A+primer\&ots=oKtA5sPdQn\&sig=HczV2Qy7mTlu1-NwPOcaIyuZhiQ.