Chapitre 17

Apports de l'imagerie numérique 3D à l'étude de l'os ancien, normal et pathologique

Hélène Coqueugniot [1,2] et Olivier Dutour [1,3,4]
1 - UMR 5199 PACEA, CNRS-Université de Bordeaux, Bâtiment B8,
Allée Geoffroy St Hilaire, 33615 Pessac Cedex, France.
2 - Department of Human Evolution, Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology,
6 Deutscher Platz, Leipzig, Allemagne.
3 - Laboratoire d'Anthropologie biologique Paul Broca, Ecole Pratique des Hautes Etudes, France.
4 - Department of Anthropology, University of Western Ontario, Canada.

17.1 Introduction

La révolution numérique, engagée au cours des années 1980, a touché de nombreux domaines, dont celui des sciences du passé. Ces méthodologies numériques appliquées à l'imagerie, ont introduit de nouvelles potentialités dans le champ de nombreuses disciplines du domaine archéologique. Celles étudiant l'os ancien (paléoanthropologie, paléontologie animale, anthropologie biologique, archéozoologie, paléopathologie, préhistoire ...) ont largement bénéficié des nouveaux apports de l'imagerie numérique. Dans l'éventail des possibilités offertes, figurent notamment la reconstruction des parties manquantes d'ossements fossiles par symétrie, la correction de déformations post-mortem, l'analyse de structures internes inaccessibles (oreille moyenne et interne, endocrâne, sinus, microstructures dentaires, ...), la modélisation de processus de croissance et de développement et la réalisation d'impressions tridimensionnelles de pièces osseuses.

En plus des diverses potentialités énumérées ci-dessus, l'obtention de données numériques permet de limiter la manipulation de pièces fossiles rares et fragiles et de contribuer à la conservation du patrimoine. Ces données numériques peuvent également être mises à la disposition de la communauté scientifique par l'intermédiaire de conservatoires dédiés.

Certains auteurs considèrent l'imagerie numérique comme une approche incontournable dans l'étude de l'os ancien, devenue à présent aussi indispensable aux disciplines concernées par son analyse que les méthodes de séquençage le sont devenues pour la génétique et la paléogénétique.

17.2 Les méthodes de l'imagerie numérique : de l'acquisition à l'impression 3D

La numérisation d'objets archéologiques peut être réalisée par différentes méthodes d'acquisition. Un premier groupe de méthodes permet l'enregistrement des données de surface de l'objet : la photogrammétrie restitue, à partir d'une couverture photographique, un objet ou un site archéologique dans ses 3 dimensions grâce à des logiciels de numérisation 3D ; le laser enregistre également des données numérisées de surface pour les restituer dans leurs 3 dimensions à l'aide de logiciels dédiés.

Un second groupe de méthodes permet l'acquisition de données numériques d'objets à partir de rayonnements pénétrants (rayons X, THz). Les différents niveaux de densité de l'objet traversé par les rayonnements sont convertis en données volumiques (voxels) qui sont traitées par des logiciels de reconstruction pour fournir une image tridimensionnelle.

La reconstruction tridimensionnelle d'objets réels à partir de leur numérisation aboutit donc à une sorte de copie virtuelle de ces objets. Cependant, la conformité à l'original de cette copie n'est pas une évidence en soi. En effet, la précision de l'acquisition des données numériques et le type d'algorithme utilisé pour les reconstructions influent fortement sur la précision et l'exactitude de la copie virtuelle de l'objet [1].

Dans cette perspective, une collaboration entre spécialistes des sciences archéologiques et spécialistes des sciences du numérique s'avère nécessaire afin d'adapter au mieux la méthodologie informatique aux besoins de la recherche archéologique, notamment pour l'étude des ossements anciens.

Ce type de collaboration a pu aboutir (par exemple sur le pôle bordelais, entre le Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique, LaBRI UMR 5800 et l'Unité mixte de recherche en Anthropologie biologique et en Préhistoire, PACEA UMR 5199), à la mise au point d'une chaîne de traitement numérique, allant de l'acquisition à l'impression 3D (Figure 1). Cette chaîne, adaptée aux matériaux osseux découverts en contexte archéologique ou provenant de collections anatomiques, est constituée de différents maillons :

— « l'acquisition » , réalisée par rayons X en tomodensitométrie, récolte le signal de l'ossement étudié.
— « la reconstruction » permet la transformation du signal en image 2D ou 3D. Il est en effet possible de reconstruire la géométrie bidimensionnelle et tridimensionnelle d'un objet à partir d'une série de projections mesurées autour de celui-ci en utilisant le théorème de Radon [2]. Un balayage systématique avec plusieurs angles d'incidences (par rotation du système) permet de reconstruire précisément l'objet imagé. Ces images sont souvent entachées de bruit : les niveaux de gris présents dans l'image ne correspondent pas toujours à de réelles absorptions de tissus.
— « la segmentation » est une phase de traitement permettant un « débruitage » et une extraction des zones d'intérêt. La segmentation va ainsi permettre de récupérer, avec un algorithme spécifique, une région d'intérêt sous la forme d'un ensemble de voxels.

— il est alors possible, soit de faire des « analyses volumiques » (accès aux structures internes, mesures 1D euclidiennes ou 3D, entre les centres des voxels), soit de rejoindre le maillon de « l'extraction de surface » pour obtenir un maillage polygonal (pour des mesures géodésiques 1D ou 2D, courbes, angles et surfaces notamment).
— dans le dernier maillon « impression 3D » , le maillage polygonal est transmis à l'imprimante 3D pour impression, aboutissant à la matérialisation de l'image numérique de l'objet nommée par certains « virtualité réelle » ("*real virtuality*") [3-4]. Cette terminologie n'est pas utilisée par tous les spécialistes du numérique 3D, certains préférant parler de « virtualité réaliste » .

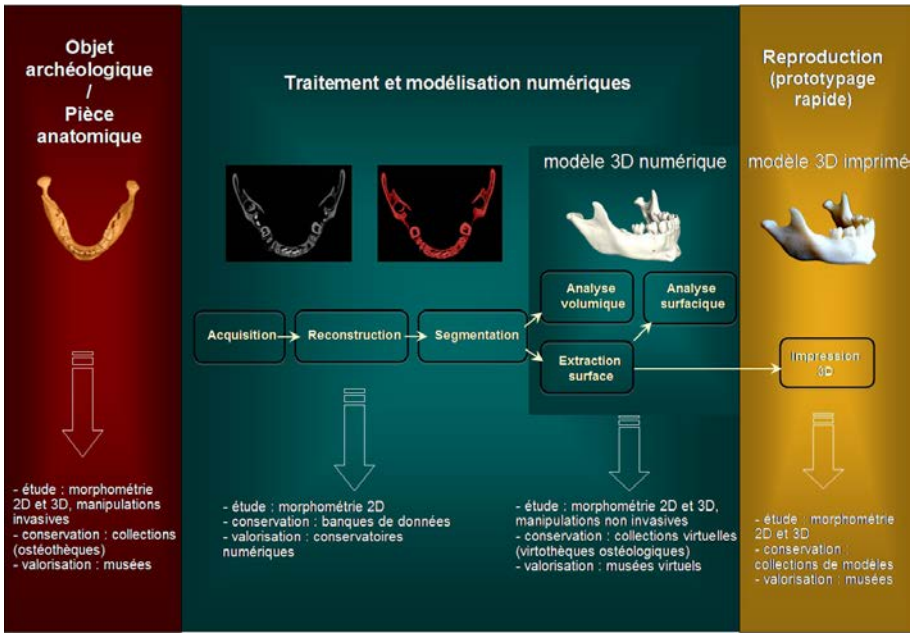


Figure 1 – Schéma de la chaîne de traitement d'imagerie numérique.

Pour les phases de reconstruction et segmentation, un certain nombre de logiciels de visualisation 3D sont disponibles : certains sont commercialisés, d'autres sont libres en "*Open-Source*". La plupart des logiciels du marché fonctionnent par extraction d'isosurface pour la vue surfacique comme par exemple Avizo® et Osirix®.

Parmi les logiciels libres disponibles, TIVMI® (*Treatment and Increased Vision for Medical Imaging*) a été développé au sein du laboratoire PACEA [5] et est téléchargeable gratuitement sur son site (http ://www.pacea.u-bordeaux1.fr/TIVMI/) pour Windows® et Linux®. TIVMI® lit différents formats de fichiers (Dicom, Hdr Img, Pgm3D, PNG, Vff, raw ...). C'est, à l'heure actuelle, le seul logiciel d'imagerie médicale et de 3D qui intègre de manière automatique la fonction du HMH (*Half Maximum Height)* [6]. La méthode HMH, développée pour des analyses 2D, permet d'obtenir sur une image scanner la position exacte de l'interface entre des tissus de différentes densités : air, tissus mous, os, dents (Figure 2).

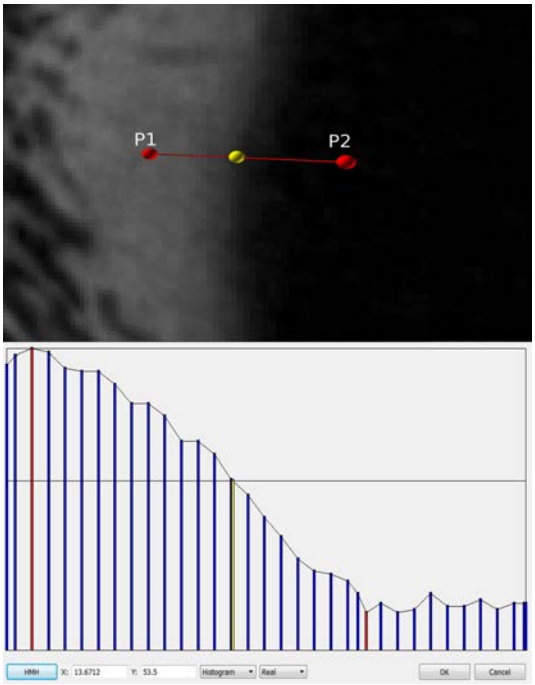


FIGURE 2 – Illustration du principe de la méthode du HMH sur une coupe tomodensitométrique.



FIGURE 3 – Imprimante 3D (Eden 250) et exemple d'impression 3D d'une colonne vertébrale pathologique ayant fait l'objet d'un remontage virtuel après son extraction de surface à partir d'images tomodensitométriques.

La valeur du HMH correspond à la densité moyenne entre les densités minimale et maximale d'un profil de niveaux de gris des pixels traversés par un segment. La méthode a été étendue à la 3D sur TIVMI®.

La robustesse de TIVMI® pour la précision biométrique a été récemment démontrée [1] par rapport à d'autres logiciels de reconstruction 3D libres ou commercialisés qui utilisent d'autres algorithmes comme les Marching Cubes.

La matérialisation d'une image numérique en objet réel a été rendue possible à partir des années 90, notamment par la technique dite de stéréolithographie qui a été appliquée notamment en paléoanthropologie [4,7]. Au départ, ce procédé relativement complexe et onéreux, nécessitait l'utilisation d'un bain de résine et un important travail de polissage post-impression. Grâce aux progrès réalisés sur les procédés de photopolymérisation, il est possible d'accéder, dans certains laboratoires, à des imprimantes 3D qui sont dotées de buses déposant des gouttelettes de matériaux et produisant une succession de couches 2D solidifiées pour récréer le volume de l'objet en 3D. Leur précision dans la reproduction 3D est actuellement de l'ordre de quelques dizaines de microns. Ce procédé permet notamment de restituer dans leur position d'origine des ensembles osseux devenus disjoints comme par exemple un squelette axial (Figure 3).

Dans les sciences archéologiques, l'étude d'ossements anciens, normaux ou pathologiques, peut maintenant ainsi bénéficier de l'association d'acquisitions tomodensitométriques à haute résolution, d'un logiciel de reconstruction 3D de grande précision et d'une imprimante 3D d'une résolution de 16μm. Cette association constitue une chaîne de traitement d'imagerie numérique qui a pu être brevetée sous le nom de VIRCOPAL® (VIRtual COllection of PALeospecimens) [8]. Son objectif est de développer, à destination de l'enseignement et de la recherche, des reproductions 3D bio-fidèles en résine de pièces ostéologiques archéologiques ou paléontologiques.

17.3 Exemples d'applications de l'imagerie numérique à l'os ancien

L'imagerie numérique s'applique avec profit à l'étude de l'os ancien à la fois dans ses aspects normaux et pathologiques.

17.3.1 L'os ancien normal

L'imagerie numérique permet des avancées dans le domaine de l'évolution de la lignée humaine et des espèces animales en offrant de nouvelles possibilités d'analyse des ossements fossiles en les préservant de toute manipulation potentiellement destructive. Il est ainsi possible virtuellement de dégager un fossile de sa gangue, d'accéder à ses structures internes, de réaliser des moulages virtuels d'empreintes laissées sur l'os par des structures anatomiques disparues comme le cerveau et de rassembler ces données numériques dans des conservatoires constituants des collections virtuelles que l'on peut nommer « virtothèques ostéologiques » [9]. Ces virtothèques peuvent constituer des référentiels précieux pour la communauté scientifique tout en assurant leur valorisation et leur préservation patrimoniale.

Quelques exemples concernant la paléoanthropologie, l'anthropologie biologique, la paléontologie animale et l'archéozoologie illustrent cet intérêt.

Le fossile d'enfant *Homo erectus* de Mojokerto (Java, Indonésie) daté entre 1,8 et 1,3 million d'années était supposé être âgé de 4 à 8 ans au moment de son décès. Cette estimation se fondait sur les critères classiques de maturation, visibles sur l'exocrâne.

Les méthodologies de l'imagerie numérique et de la 3D ont permis de visualiser la fontanelle antérieure qui apparaît clairement ouverte ainsi que la morphologie d'une partie interne de l'os temporal. Ces structures anatomiques ainsi observées virtuellement, renseignent sur le niveau de maturation crânienne et permettent de proposer un nouvel âge au décès de cet enfant qui s'établit autour de l'âge de 1 an. La comparaison de cette nouvelle estimation de l'âge avec son volume endocrânien témoigne d'une maturité cérébrale précoce chez *Homo erectus*, très différente de celle de l'homme actuel [10].

Les collections ostéologiques de référence pour l'anthropologie sont constituées de spécimens pour lesquels certaines données biographiques (âge civil au décès, sexe, stature, maladies, profession, filiation, cause du décès) sont connues. Ces collections sont rares, d'accès parfois restreint et géographiquement très dispersées en Europe et en Amérique du Nord. Les référentiels ostéologiques de sujets immatures indispensables à la compréhension des processus de croissance et leur variabilité, sont encore plus rares.

En France, l'une des plus importantes collections ostéologiques de spécimens non-adultes est conservée au Département d'Anatomie Normale de la Faculté de Médecine de Strasbourg. L'ensemble de la collection crâniologique a fait l'objet d'acquisitions tomodensitométriques qui permettent de conduire des recherches approfondies non destructives et de pérenniser cette collection tout en la préservant.

Il est ainsi possible de reconstituer les volumes endocrâniens (Figure 4) des enfants de la collection sans aucun dommage pour les pièces ostéologiques et de fournir ainsi de nouvelles données sur la croissance encéphalique dans l'espèce humaine [11] permettant d'en mieux comprendre l'évolution.

Pour la paléontologie animale et l'archéozoologie, l'imagerie numérique et les reconstructions 3D permettent, comme pour les collections anthropologiques, de constituer des corpus de données ostéologiques virtuelles. Pour certaines espèces, les collections de référence sont rares, peu accessibles ou inexistantes, notamment en ce qui concerne les espèces protégées ou en voie de disparition (Figure 5). L'imagerie numérique permet de pérenniser et de protéger les collections ostéologiques existantes grâce aux conservatoires de données numériques (projets de sauvegarde du patrimoine, comme le projet Archéogrid - TGIR Huma-Num [12]. Elle permet également de les valoriser par leur mise en ligne. Elle autorise également par la réunion de collections ou de spécimens, la création de banque de données numériques sous la forme de virtothèques ostéologiques. Une démarche de ce type est également applicable aux collections de spécimens paléontologiques ou préhistoriques.

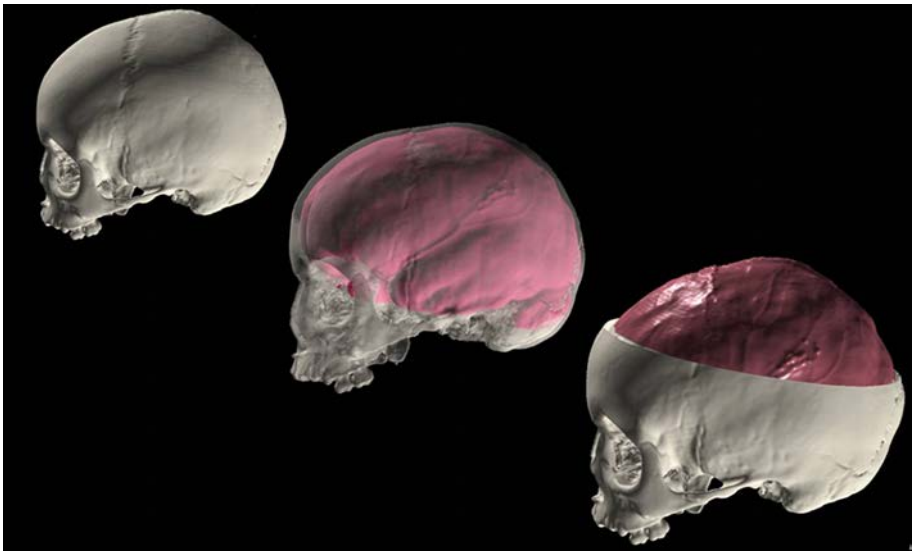


FIGURE 4 – Reconstruction 3D d'un crâne d'enfant (collection ostéologique de la faculté de médecine de Strasbourg) et de son volume endocrânien.



FIGURE 5 – Reconstruction tridimensionnelle d'une tête osseuse de gorille mâle.

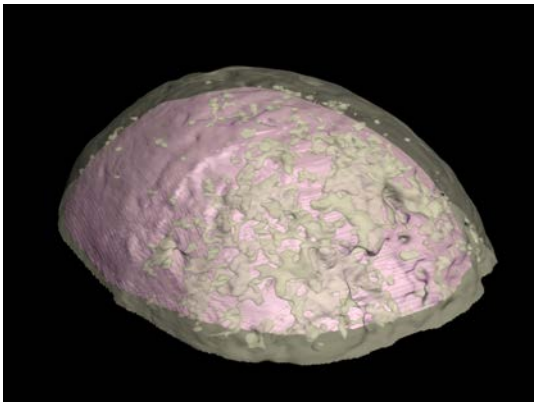


FIGURE 6 – Reconstruction tridimensionnelle d'une calotte crânienne d'un sujet masculin adulte âgé atteint de syphilis tertiaire (en opaque) comparée à la calotte non pathologique (transparence).

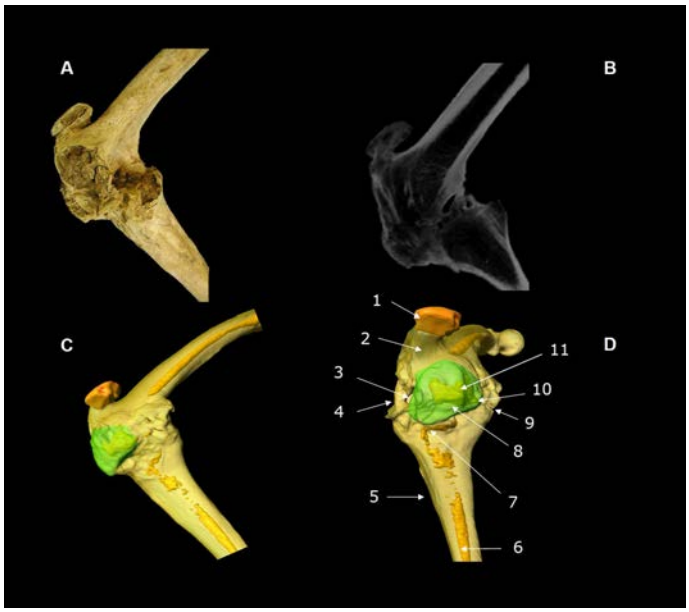


FIGURE 7 – Analyse virtuelle d'une lésion pathologique complexe (fusion de l'articulation du genou). A : cliché de la pièce paléopathologique ; B : radiographie conventionnelle ; C et D : reconstructions tridimensionnelles avec segmentation des différents éléments ; 1 : patella (en orange) ; 2 : ligamentum patellae (partie supérieure) ; 3 : dislocation articulaire ; 4 : calcification du ligament fibulaire latéral ; 5 : crête tibiale (rotation externe) ; 6 : cavité médullaire (en jaune) ; 7 : métaphyse avec cavitation (en jaune) ; 8 : calcification d'une bourse séreuse (en vert) ; 9 : fusion articulaire ; 10 : cloaque ; 11 : cavitation intra-bourse (en jaune)

17.3.2 L'os ancien pathologique

L'imagerie tri-dimensionnelle a permis récemment des avancées importantes en paléopathologie humaine. Cette discipline se situe à l'interface de l'archéologie, de l'anthropologie biologique et des sciences bio-médicales [13]. Dès ses débuts, la paléopathologie a utilisé la radiographie comme aide au diagnostic rétrospectif [14-15] qui s'est progressivement individualisée comme discipline, la paléoradiologie [16]. Longtemps limitée à la 2D, les études paléoradiologiques s'ouvrent à présent à une approche volumique offrant ainsi de nouvelles possibilités pour le diagnostic rétrospectif, notamment en reconstituant les processus à l'origine des lésions paléopathologiques [17]. Elles ouvrent en outre des perspectives dans le domaine de la formation et de la diffusion des connaissances. Deux exemples peuvent illustrer cette contribution.

Le premier est celui d'un crâne humain pathologique d'un sujet d'une cinquantaine d'années datant du début du XX^{e} siècle, exhumé lors d'une fouille de sauvetage. Le diagnostic de syphilis tertiaire a été fait par l'examen morphologique dès la fouille, puis confirmé en laboratoire par l'examen des coupes scanners (Figure 6).

L'intérêt de l'imagerie 3D ne réside pas dans le diagnostic, qui repose sur l'examen morphologique et les analyses radiologiques et tomodensitométriques 2D, mais dans la possibilité de reconstituer, grâce à la 3D, le processus à l'origine des lésions crâniennes observées et de le quantifier. Il a été ainsi possible de reconstituer virtuellement une calotte crânienne non pathologique de cet individu (par modélisation à partir d'un référentiel tomodensitométrique de calottes saines d'hommes de même classe d'âge) et de la comparer par superposition à la calotte réelle pathologique. Ceci montre que les lésions caractéristiques de la syphilis crânienne (caries sèches ou *caries sicca*)[18-19] sont principalement localisées dans l'espace diploïque des régions frontales et pariétales et qu'elles sont responsables d'une augmentation de volume osseux (os pathologique) de 60 % par rapport à l'état initial. On pourrait ainsi imaginer, si l'on est capable d'estimer la vitesse moyenne de production pathologique, qu'il serait ainsi possible de mesurer par cette méthode le temps d'évolution de la maladie, ce qui n'a encore jamais été possible en paléopathologie.

Le second exemple est celui d'une ankylose du genou datant de la période médiévale hongroise [20]. A partir d'une lésion complexe de fusion articulaire totale, dont l'image radiologique en 2D est de lecture difficile, la segmentation des différentes structures anatomiques et la reconstruction tridimensionnelle ont permis d'aider à la compréhension des processus en cause et au diagnostic rétrospectif. La destruction de l'articulation accompagnée de dislocation et de fusion en flexion à 90° apparaît liée à une infection de l'os et de l'articulation (ostéoarthrite) très probablement d'origine tuberculeuse, la patella a fusionné à la partie antérieure des condyles fémoraux par ossification du tendon du muscle quadriceps, une calcification s'est développée à la partie antérieure, à la place initiale de la patella (Figure 7). Cette dernière correspond vraisemblablement au développement d'une bourse séreuse consécutive à l'utilisation d'un dispositif de marche (attelle en bois). Toutes ces informations fournies par l'analyse volumique des données numériques ne sont accessibles ni sur les clichés radiographiques ni sur les coupes tomodensitométriques.

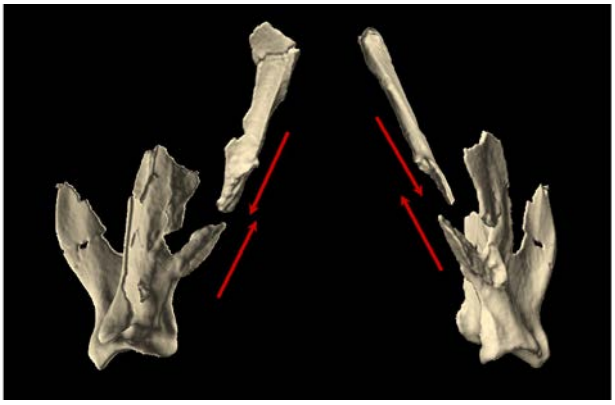


FIGURE 8 – Reconstruction tridimensionnelle d'une scapula fracturée de chien datant du Moyen Age.

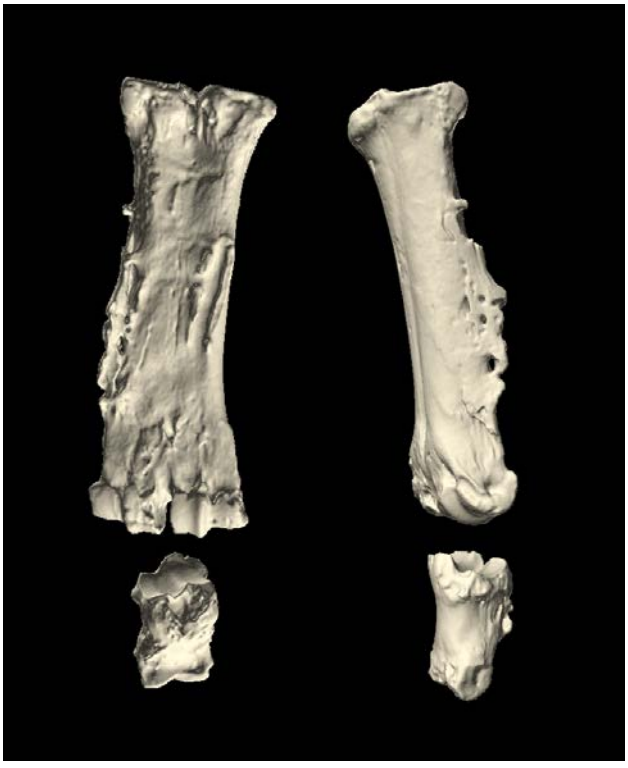


FIGURE 9 – Reconstruction tridimensionnelle d'un métacarpe et d'une phalange de bovidé domestique portant des traces d'un syndrome de surcharge fonctionnelle, période Carolingienne.

Cette approche méthodologique d'imagerie numérique s'applique de la même manière à la paléopathologie animale. Celle-ci procède également d'une approche interdisciplinaire nécessitant des connaissances en anatomie et ostéologie des Vertébrés, en médecine vétérinaire, en archéozoologie et en taphonomie, notamment.

Deux exemples d'application datant du Haut Moyen-Age [21] sont présentés ici. Le premier (Figure 8) concerne une scapula gauche de chien domestique (*Canis lupus familiaris*) provenant d'un site datant des VII-VIIIèmes siècles à Epernon (Eure-et-Loir). A partir de la numérisation des deux principaux fragments de cette scapula, les reconstructions tridimensionnelles ont permis de mettre en évidence, de manière plus précise qu'à l'oeil nu, une modification de la surface de contact anatomique entre ces deux fragments. Il existe en effet un remodelage de ces surfaces qui correspond à des processus survenus durant la vie de l'animal. Il est possible d'effectuer un remontage virtuel en confrontant ces surfaces de contact entre ces deux pièces osseuses et de démontrer ainsi l'origine de cette fragmentation de la scapula qui correspond en fait à une pseudarthrose (fracture non consolidée). Dans cette région exposée du dos de l'animal, cette atteinte peut résulter d'un acte humain volontaire (coup de bâton) qui rentre dans le cadre traumatologique du « chien battu » [22].

Le second exemple (Figure 9) correspond à un métacarpe et une phalange d'un bovidé domestique (*Bos taurus*) datant de la période carolingienne issu d'un site fouillé à Saint-Dizier (Haute-Marne). Ces os présentent macroscopiquement une production ostéophytique développée sur les rebords latéraux de leur face palmaire. Les coupes tomodensitométriques confirment que cette production osseuse résulte de la calcification de structures fibro-ligamentaires s'insérant sur les rebords latéral et médial du métacarpe principal, qu'il est possible de visualiser en 3D plus précisément que sur les pièces originales. Il s'agit d'enthésophytes (calcifications réactionnelles des enthèses) qui peuvent être la conséquence d'une surcharge fonctionnelle des structures tendineuses et musculaires liées à des fonctions de trait ou de labour. Ces syndromes de sur-utilisation ont été décrits en paléopathologie humaine sous le nom de marqueurs osseux d'activités [23].

17.4 Conclusions/Perspectives

L'imagerie numérique et les reconstructions tridimensionnelles représentent une approche complémentaire des méthodes classiques d'étude de l'os ancien, normal et pathologique, riche en potentialités. Elles deviennent maintenant incontournables pour certains auteurs [3, 4]. Ces méthodes, issues des sciences du numérique, démultiplient les possibilités d'études en ostéologie, tout en préservant les pièces originales et en ouvrant de nouveaux champs de compétences dans les domaines de la formation, de la conservation et de la valorisation.

Il faut cependant garder à l'esprit que les modèles 3D des pièces originales sur lesquels reposent les analyses morphométriques dépendent à la fois de la segmentation qui peut être largement observateur-dépendante et des algorithmes utilisés dans la phase de reconstruction.

Malgré leurs avantages, les acquisitions tomodensitométriques présentent toutefois l'inconvénient de soumettre les pièces originales à un rayonnement ionisant (Rayons X) susceptible d'altérer l'information génétique (ADN) contenue dans les ossements anciens, même si ce niveau de dégradation biologique reste encore à quantifier. Le cas échéant, des alternatives de rayonnements pénétrants non ionisants comme le Térahertz sont à l'étude [24-25], mais les images obtenues n'ont pas encore atteint la précision des images tomodensitométriques.

Ces quelques verrous méthodologiques n'obèrent en rien l'intérêt majeur de l'imagerie numérique dans le domaine des sciences archéologiques et de l'ostéologie.

Bibliographie

[1] P. Guyomarc'h, F. Santos, B. Dutailly, P. Desbarats, C. Bou, H. Coqueugniot, Three-dimensional computer-assisted craniometrics : a comparison of the uncertainty in measurement induced by surface reconstruction performed by two computer programs. Forensic Science International. 219, 221-227, 2012.

[2] J. Radon, Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten, Proc. Saxony Academy of Science. 69, 262-277, 1917.

[3] P. Stucki, C.P.E. Zollikofer, H.F Sailer, Virtual Reality and Real Virtuality in cranio-maxillofacial surgery. Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery. 24, 111, 1996.

[4] C.P.E. Zollikofer, M.S. Ponce de León, R.D. Martin R.D., Computer-assisted paleoanthropology. Evolutionary Anthropology : Issues, News, and Reviews. 6, 41–54, 1998.

[5] B. Dutailly, H. Coqueugniot, P. Desbarats, S. Gueorguieva, R. Synave, « 3D surface reconstruction using HMH algorithm », Proc. IEEE International Conference on Image Processing, 2505-2508, 2009.

[6] C.F. Spoor, F.W. Zonneveld, G.A. Macho, Linear measurements of cortical bone and dental enamel by computed tomography : applications and problems. American Journal of Physical Anthropology. 91, 469–484, 1993.

[7] H. Seidler, D. Falk, C. Stringer, H. Wilfing, G.B. Müller, D. zur Nedden, G.W. Weber, W. Reicheis, J.-L Arsuaga, A comparative study of stereolithographically modelled skulls of Petralona and Broken Hill : implications for future studies of middle Pleistocene hominid evolution. Journal of Human Evolution. 33, 691-703, 1997.

[8] H. Coqueugniot, P. Desbarats, B. Dutailly, O. Dutour, « Procédé de modélisation d'une pièce formée de tissu osseux ». Brevet français 1151284, 2011.

[9] H. Coqueugniot, B. Dutailly, P. Desbarats, G. Palfi, M. Panuel, O. Dutour, « Quel avenir pour les virtothèques ostéologiques et paléopathologiques ? », Proc. Colloque du Groupe des Paléopathologistes de Langue Française, 24, 2012.

[10] H. Coqueugniot, J.-J. Hublin , F. Veillon, F. Houët, T. Jacob, Early brain growth in *Homo erectus* and implications for cognitive ability. Nature. 431, 299-302, 2004.

[11] H. Coqueugniot., J.-J. Hublin, Age-related changes of digital endocranial volume during human ontogeny : Results from an osteological reference collection. American Journal of Physical Anthropology. 147, 312-318, 2012.

[12] http ://archeovision.cnrs.fr/spip.php ?rubrique40 Site consulté en Mai 2014.

[13] O. Dutour, *La paléopathologie*, 171 pages. Ed. CTHS, Paris. 2011.

[14] A. Dedekind, A novel use for the Roentgen rays. British Journal of Photography. 43, 131, 1896.

[15] A. Londe, Les rayons Roentgen et les momies. La Nature. 25, 103-105, 1897.

[16] R.K. Chhem, D.R. Brothwell, *Paleoradiology. Imaging mummies and fossils*, 163 pages. Ed. Springer, Berlin. 2008.

[17] H. Coqueugniot, P. Desbarats, B. Dutailly, M. Panuel, O. Dutour, « Les outils de l'imagerie médicale et de la 3D au service des maladies du passé » dans Colloque Virtual Retrospect 2009, Collection Archéovision, Ed. Ausonius Bordeaux. p. 177-180, 2010.

[18] C.J. Hackett, *Diagnostic Criteria of Syphilis, Yaws, and Treponarid (Treponematoses) and of Some Other Diseases in Dry Bones*, 132 pages. Ed. Springer-Verlag, Berlin. 1976.

[19] O. Dutour, G. Palfi, J. Berato, J.P. Brun, *L'origine de la syphilis en Europe : avant ou après 1493 ?*, 319 pages. Ed. Errance, Paris. 1994.

[20] L. Paja, H. Coqueugniot, O. Dutour, R. Willmon, G.L. Farkas, A. Palkó, G. Pálfi, Knee ankyloses associated with tuberculosis from the medieval Hungary – differential diagnosis based on medical imaging techniques. International Journal of Osteoarchaeology. DOI : 10.1002/oa.2284, 2012.

[21] A. Herledant, J.-H. Yvinec, H. Coqueugniot, O. Dutour, « A methodological approach for the study of animal palaeopathologies : case studies from medieval sites in Northern France », Proc. Fifth ICAZ Animal Palaeopathology Working Group Conference, 2013.

[22] H.M.C. Munro, M.V. Thrusfield, Battered pets : non-accidental physical injuries found in dogs sans cats. Journal of Small Animal Practice. 42, 279-290, 2001.

[23] O. Dutour, Activités physiques et squelette humain : le difficile passage de l'actuel au fossile. Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris. 4, 233-241, 1992.

[24] L. Öhrström, A. Bitzer, M. Walther, F.J Rühli, Technical note : terahertz imaging of ancient mummies and bone. American Journal of Physical Anthropology. 142, 497–500, 2010.

[25] B. Recur, A. Younus, S. Salort, P. Mounaix, B. Chassagne, P. Desbarats, J.P. Caumes, E. Abraham, Investigation on reconstruction methods applied to 3D terahertz computed tomography. Optics Express. 19, 5105-5117, 2011.