Paléo-imagerie par rayons X : une méthode d'exploration transdisciplinaire, de l'archéologie à la chirurgie

Hélène Coqueugniot

UMR 5199 PACEA, Université de Bordeaux ; Laboratoire d'anthropologie biologique Paul-Broca, École Pratique des Hautes Études, PSL Research University ; Department of Human Evolution, Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology, Leipzig

Résumé : L'imagerie par rayons X, bi- et tridimensionnelle, est devenue une méthodologie incontournable dans de nombreux champs disciplinaires dont celui des sciences archéologiques. Contrairement aux autres méthodes d'imagerie permettant seulement des acquisitions de surface (photographie et photogrammétrie, scanner laser), le rayonnement X permet également des acquisitions de volume, ce qui s'avère être un avantage fondamental dans les indications nécessitant de visualiser du contenu sans toucher au contenant. Cette propriété physique du rayonnement X de traverser la matière et de révéler l'intérieur des objets sur des images projetées en 2 dimensions a été appliquée très tôt au domaine archéologique, dès l'invention même de la radiologie en 1895, en parallèle avec son développement fulgurant dans le domaine médical. Les applications « archéométriques » des rayons X ont fait émerger le terme de paléoradiologie, qui définit l'application du rayonnement X à l'étude de matériaux bio-archéologiques.

Un siècle après, les méthodes d'acquisition par rayons X se sont considérablement développées (radiologie numérique, tomodensitométrie, microtomographie RX) et le traitement des images a ouvert l'accès, grâce à la révolution numérique, à une nouvelle dimension. L'introduction de cette troisième dimension pour l'imagerie radiologique a permis de nombreuses avancées en recherches fondamentale et appliquée dans le domaine archéologique, tout en renouvelant considérablement les possibilités de conservation et de valorisation du patrimoine. En constituant un réseau interdisciplinaire, nous avons développé, à partir de la tomodensitométrie, une chaîne complète d'imagerie tridimensionnelle, initiée pour l'anthropologie biologique et qui trouve ses applications dans le domaine de l'archéologie et plus récemment dans celui de la chirurgie reconstructrice.

En parallèle avec l'utilisation des rayons X, d'autres méthodes d'acquisitions d'images apportent également leurs contributions à l'archéologie. Leur intégration dans une approche transdisciplinaire utilisant l'ensemble des modalités non-destructives d'acquisition d'images et de leur représentation (multimodale et multidimensionnelle) a été nommée paléo-imagerie. La paléo-imagerie s'exprime à la fois sur le terrain et en laboratoire, fonctionne de manière diachronique (sans focus chronologique, de la préhistoire aux périodes contemporaines) et holistique en contextualisant l'objet dans son environnement archéologique. Dans cette optique, la paléo-imagerie a toute sa place au sein des méthodes de l'archéométrie.

1 Introduction

Grâce à la révolution numérique, l'imagerie bi- et tridimensionnelle, issue d'un croisement de méthodes relevant de la physique et de l'informatique, est devenue incontournable dans de nombreux champs disciplinaires, incluant les sciences archéologiques. Ses contributions multiples dans le domaine des sciences du passé légitiment son intégration au rang des méthodes archéométriques sous l'appellation de paléo-imagerie. Cette approche, multimodale, multidimensionnelle et transdisciplinaire, utilise dans le domaine de l'archéologie des moyens d'acquisition allant d'une part de la photographie numérique (grâce aux nouveaux procédés de photogrammétrie) et le scanner laser pour des acquisitions de surface et d'autre part le rayonnement X pour des acquisitions de volume, modalité d'acquisition que nous traiterons dans ce chapitre.

Dès l'invention de la radiologie en 1895, l'archéologie a pu bénéficier des propriétés physiques des rayons X révélant l'intérieur des objets sous forme d'images en 2 dimensions. Près d'un siècle après, les moyens d'acquisition par rayons X et de traitement des images produites se sont considérablement développés (radiologie numérique, tomodensitométrie, microtomographie RX). L'introduction d'une troisième dimension à l'imagerie radiologique a permis de nombreuses avancées en recherches fondamentale et appliquée, tout en renouvelant considérablement les possibilités de conservation et de valorisation du patrimoine.

Grâce à la construction d'un réseau interdisciplinaire, nous avons développé, à partir de la tomodensitométrie, une chaîne complète d'imagerie tridimensionnelle, initiée pour l'anthropologie biologique et qui trouve ses applications dans le domaine de l'archéologie et plus récemment dans celui de la chirurgie reconstructrice.

2 Petite histoire de l'imagerie par rayons X

La radiologie occupe, dès ses débuts, une place particulière dans le domaine de l'imagerie, liée à son application simultanée à la médecine et à l'archéologie. Elle a permis le développement de la tomodensitométrie, d'abord conçue pour des applications cliniques mais rapidement sollicitée par des questionnements archéologiques. Le besoin de précision a donné naissance à la microtomographie RX, méthode adaptée pour l'étude microstructurale des tissus biologiques minéralisés et qui s'est rapidement ouverte à l'analyse fine de nombreux autres matériaux vivants et inertes, dont divers archéomatériaux.

2.1 La naissance de la radiologie : médecine et égyptologie

En novembre 1895, Wilhelm Conrad Röntgen, professeur allemand de physique à l'université de Würzburg en étudiant les rayons cathodiques avec un tube à cathode froide (dit tube de Crookes) découvre un rayonnement de nature encore inconnue qu'il nomme donc rayons « X ». Il constate que ces rayons sont très pénétrants, peuvent traverser de nombreux matériaux et impressionner des plaques photographiques. Après plusieurs expériences sur des matériaux variés, il réalise en décembre 1895 le premier cliché radiographique ou « Röntgenogram » qui nous est parvenu, celui de la main de son épouse, Anna Bertha Ludwig. Le cliché, assez flou, révèle en silhouette l'ar-



FIGURE 1 – Première radiographie de W. Röntgen le 22 décembre 1895 : main de son épouse Anna Bertha. Creative Commons by-nc 2.0 UK.

chitecture du squelette de la main entouré d'un halo gris correspondant aux tissus mous ainsi que la projection très contrastée de la bague à l'annulaire (figure 1). À peine un mois plus tard, Jean Alban Bergonié, titulaire de la chaire de physique à l'université de Bordeaux reproduit l'expérience de Röntgen, juste avant que celui-ci ne la présente officiellement devant les membres de la Société physico-médicale de Würzburg le 28 décembre 1895. Les comptes rendus de la Société sont publiés le 23 janvier 1896 [1] et la traduction anglaise de l'article parait le même jour dans la revue Nature [2]. Wilhelm Röntgen obtient le premier prix Nobel de physique en 1901 grâce à la découverte de ces rayons dont la nature électromagnétique ne sera démontrée que par la suite.

Cette capacité des rayons X à traverser la matière (dont le corps humain) et à révéler ses structures internes a représenté une véritable révolution pour les sciences médicales. La découverte de Röntgen est tout d'abord appliquée en chirurgie dentaire : en janvier 1896, le D^{r} Otto Walkhoff réalise à Brunswick une première radiographie dentaire de ses propres molaires. Dès l'année suivante, le médecin français Antoine Louis Gustave Béclère développe le premier enseignement de la radiologie médicale, crée le premier laboratoire de radiologie à Paris à l'hôpital Tenon puis le premier centre français de radiologie à l'hôpital Saint-Antoine en 1898.



Figure 2 – Observation virtuelle d'une momie d'enfant du musée de Senckenberg de Franckfort. A : radiographie des genoux de l'enfant par Walter König en 1896 [4] ; B : photographie de la momie ; C : reconstruction multi-planaire de la même région anatomique 120 plus tard avec mise en évidence de ligne de Harris [57]. © Zesh *et al.*, 2016, Elsevier Ltd. CC BY-NC-ND license (http ://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Cet engouement pour la radiologie à ses débuts ne s'est cependant pas limité à ses applications cliniques. Très rapidement, la radiologie est en effet utilisée par les égyptologues, pour analyser les momies issues des collections européennes. Ainsi, en février 1896, soit seulement un mois après la première application clinique, Alexander Dedekind, égyptologue autrichien, fait pratiquer la première radiographie d'une momie d'ibis du musée d'Histoire naturelle de Vienne [3]. Un mois plus tard, Walter König publie un ouvrage présentant 14 radiographies de momies égyptiennes animales et humaines du musée Senckenberg de Francfort [4]. Ces clichés révèlent à la communauté scientifique et au public l'intérêt de cette toute nouvelle méthode d'imagerie (publiée seulement trois mois auparavant) dans le domaine de l'archéologie, de l'anthropologie et de la muséologie (figure 2).

À peine quelques années plus tard, Otto Walkhoff fait bénéficier l'anthropologie de sa pratique de la radiographie sur les pièces fossiles des néandertaliens de Krapina [5], la mandibule de La Naulette et les mandibules et maxillaires de Spy [6].

L'intérêt de l'utilisation des rayons X pour l'étude des momies et leur préservation a fait l'objet en 1931 de la première monographie entièrement consacrée à l'étude radiographique de momies égyptiennes et péruviennes, ouvrage de synthèse publié par le paléopathologiste américain Roy Lee Moodie [7]. L'auteur illustre par une iconographie abondante de nombreux exemples dans lesquels l'utilisation de la radiologie s'est avérée déterminante dans la compréhension des traitements funéraires et des processus de momification utilisés par les sociétés anciennes de l'Égypte dynastique et des mondes amérindiens, dans la détermination anthropologique, le diagnostic paléopathologique et la reconnaissance d'espèces animales (figure 3). Tout en soulignant



FIGURE 3 – Momie égyptienne de chat du Field Museum of Natural History à Chicago (photographie n° 69816 et radiographie n° A470, extraites de Moodie [1931]) [7]. La radiographie révèle le squelette complet et parfaitement conservé d'un chat.

la valeur de conservation de cette méthode d'analyse physique permettant d'étudier le contenu sans altérer le contenant (enveloppements de bandelettes ou de sacs funéraires), Moodie pose également les limites de cette visualisation en mentionnant le problème de la superposition des structures traversées par les rayons X et projetées sur un même plan. En dépit de ces limites, la radiologie conventionnelle continue de rendre de bons et loyaux services à l'archéologie et à l'anthropologie pendant un demi-siècle. Dans le domaine de l'évolution humaine, l'ouvrage de Skinner et Sperber [8], *The Atlas of Radiographs of Early Man*, représente la plus grande collection de radiographies de crânes fossiles. Cependant, là encore, la radiographie montre ses limites : les structures internes des crânes fossilisés sont peu visibles, d'autant plus s'ils sont remplis d'une matrice calcifiée d'une densité radiologique comparable. Au problème de la superposition s'ajoute celui de la densité des matériaux fossiles.

2.2 De la projection à la coupe : l'invention de la tomographie

C'est justement pour pallier ces problèmes représentant également un facteur limitant au diagnostic radiologique en pratique médicale, que se sont développées les recherches ayant pour but l'amélioration de la visualisation des structures internes du corps humain. Ces recherches ont abouti à la tomographie axiale assistée par ordinateur (figure 4).

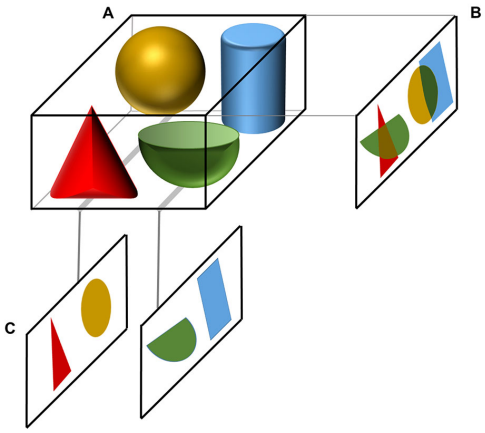


Figure 4 – Principe comparé de la radiographie et de la tomodensitométrie. A : modèle en 3 dimensions ; B : projection du volume sur un plan (principe de la radiographie) ; C : coupes dans le volume (principe de la tomodensitométrie).

Le fondement théorique de la tomodensitométrie trouve ses origines en 1917, lorsque le mathématicien autrichien Johan Radon prouve qu'il est possible de reconstituer la géométrie bidimensionnelle d'un objet à partir de la totalité de ses projections mesurées tout autour de lui selon des droites concourantes [9]. Ce n'est qu'un demi-siècle après que le physicien sud-africain Allan M. Cormack (naturalisé américain en 1966) définit à partir du théorème de Radon la base mathématique pour la reconstruction d'images acquises par tomographie RX [10-11].

Le premier prototype de scanner CT, appareil permettant de prendre plusieurs clichés radiographiques d'un même objet selon différents angles avec reconstruction d'images par calcul informatique, est construit en 1970 par Godfrey N. Hounsfield, ingénieur anglais en électrique [12]. Les applications médicales du CT-scan sont tout d'abord réservées à l'imagerie cérébrale : le premier scanner cérébral a été installé à l'hôpital Atkinson Morley de Wimbledon, en Angleterre, et le premier examen sur un patient atteint d'un kyste cérébral est pratiqué avec succès le 1er octobre 1971. Il a fallu 6 minutes d'irradiation, plusieurs heures pour acquérir les données brutes pour une seule coupe et plusieurs jours pour reconstruire une seule image à partir de ces données brutes. Pour ces CT-scans de première génération, faits d'un détecteur unique, utilisant un faisceau RX linéaire et un mouvement de translation-rotation du couple source / détecteur, avec une durée de balayage entre 20 et 30 minutes, la résolution des images était encore bien modeste avec des épaisseurs de coupe de plus d'1 centimètre ! Il fallait trouver des solutions pour diminuer d'une part le temps d'irradiation et d'autre part augmenter la résolution par la finesse des coupes.

En 1975, Hounsfield construit le premier scanner CT corps entier [13] qui devient alors largement utilisé en radiologie médicale. Cette 2e génération s'équipe de détecteurs multiples (jusqu'à 30), d'un faisceau RX devenu conique, conserve le même type de mouvement source / détecteur et réduit sa durée de balayage à seulement 90 secondes environ. En 1979 Cormack et Hounsfield obtiennent tous deux le prix Nobel de physiologie ou médecine, pour « le développement de tomographie ».

Assez rapidement, deux autres générations de scanner se succèdent, présentant une augmentation du nombre de détecteurs et une diminution du temps de balayage : la 3e génération apparue en 1980 continue d'innover : le nombre de détecteurs passe de 288 à l'origine jusqu'à plus de 700, ils sont disposés en arc de cercle ; le faisceau est toujours conique mais il y a un mouvement unique de rotation du couple source / détecteur et une durée encore raccourcie du temps de balayage à 5 secondes environ. Les innovations de la 4e génération, dans les années 1990, sont encore plus nombreuses : plus de 2 000 détecteurs sont disposés en anneau de 360° ; seule la source réalise une rotation avec une durée du balayage de quelques secondes. D'autres technologies ont été adaptées sur les scanners de 3e et 4e génération comme par exemple l'acquisition d'images en spirale par des scanners de type hélicoïdal ou l'addition d'une deuxième source d'énergie (*dual energy CT scan*) pour une meilleure visualisation des tissus non minéralisés pour le diagnostic médical.

Comme pour la radiographie, des idées d'application de la tomodensitométrie à l'archéologie ne tardent pas à germer dans l'esprit des spécialistes et c'est à nouveau dans le domaine de l'égyptologie que le premier CT-scan non médical est pratiqué. Le 27 septembre 1976 le cerveau desséché de Nakht, un jeune tisserand égyptien décédé il y a 3 200 ans dont la momie est conservée au Royal Ontario Museum de Toronto, est scanographié à l'hôpital des enfants malades de Toronto au Canada [14]. Un peu plus tard, un scanner corps entier est pratiqué sur une autre momie égyptienne (Djemaetesankh) de la même collection égyptologique [15].

On peut regretter que la momie de Ramsès II, confiée à la France en 1976 par le gouvernement égyptien pour déterminer les causes des processus de dégradation de la momie et pratiquer le traitement adapté, n'ai pas bénéficié d'une telle exploration tomodensitométrique, dans la mesure où cet appareillage commençait à équiper les hôpitaux français. Ironie de l'Histoire, l'illustre pharaon ayant régné sur l'Égypte de 1279 à 1213 avant notre ère, reçu en France avec les honneurs d'un chef d'État et hébergé au musée de l'Homme pendant huit mois, n'aura pas eu droit au même privilège technologique qu'un modeste tisserand de ses sujets.

Dès le début des années 80, la paléontologie et la paléoanthropologie bénéficient à leur tour de la tomodensitométrie par rayons X : plusieurs spécimens de fossiles animaux et humains sont analysés par cette méthode : lémuriens fossiles [16], carnivores fossiles [17], mammifères fossiles oligocènes [18], *Pithecanthropus* [19-20], *Australopithecus africanus* [21].

2.3 Encore plus de précision : l'invention de la microtomographie RX

Tant dans le domaine industriel qu'en recherche bio-médicale, l'amélioration de la précision des acquisitions tomographiques est apparue rapidement nécessaire. En effet la résolution des scanners médicaux définie par la taille du pixel qui s'exprime selon une échelle (sub)millimétrique même pour les dernières générations de scanners CT, est insuffisante pour explorer les structures fines de divers matériaux, organiques ou inertes. En adaptant le principe du CT-scan médical, Jim Elliott, biophysicien britannique spécialiste de la physico-chimie des cristaux de phosphates de calcium, notamment des tissus minéralisés dentaires, conçoit et construit au début des années

80 un appareillage destiné à l'acquisition par tomographie RX d'images dont la dimension du pixel est de l'ordre du micro- ou du nanomètre : le micro-CT est né. Les premières images microtomographiques qu'il publie sont celles de la coquille d'un petit escargot tropical, avec une taille de pixel de 50 microns environ [22]. Des physiciens de l'Université du Michigan sont les premiers à construire un micro-CT pour évaluer la microstructure tridimensionnelle de l'os trabéculaire [23-24]. Les premiers micro-scanners commerciaux se développent à partir de 1994 et sont immédiatement utilisés pour l'imagerie des microstructures osseuses [25-26]. Le micro-CT dans ses systèmes in- et ex-vivo devient la référence incontournable dans l'exploration du tissu osseux, parallèlement au développement des applications industrielles, qui deviennent prédominantes. La microtomographie RX perd ainsi le label « médical » de l'imagerie qui demeure celui du CT-scan.

Les applications archéologiques de la micro-tomographie sont récentes et se sont développées dans le champ de la paléoanthropologie au début des années 2000, essentiellement pour les études des dents anciennes [27-31] ; autour des années 2010, elles s'ouvrent à l'analyse d'autres matériaux archéologiques : métaux, céramiques, industrie lithique, pétrologie du bâti, papyri et parchemins antiques, macro-restes végétaux [32-36].

3 De la deuxième à la troisième dimension : l'imagerie tridimensionnelle

L'introduction de la 3D constitue une nouvelle révolution qui s'engage dans le champ de l'imagerie numérique au début des années 80. Le principe de la reconstruction d'images en 3 dimensions à partir des acquisitions tomodensitométriques repose sur la restauration du volume par l'empilement de séries de coupes scanner-CT en 2D, étape facilitée par la parfaite continuité des coupes issues des acquisitions par scanners hélicoïdaux. Du pixel (*picture element*, composante élémentaire de l'image numérique 2D) on passe alors au voxel (*volume element*) obtenu en donnant une épaisseur au pixel, ce qui structure l'image 3D.

Celle-ci est reconstruite selon 2 grands types, surfacique et volumique (figure 5).

- La reconstruction 3D surfacique nécessite une phase importante de segmentation par seuillage : l'objet à reconstruire se situe dans un intervalle de voxels de densité comprise entre un seuil inférieur et un seuil supérieur, en dehors duquel les autres voxels sont éliminés. Les surfaces sont créées en reliant tous les voxels de même densité.

- Le rendu 3D volumique [37] utilise une méthode de projection sur un plan de l'ensemble des données du volume à reconstruire en attribuant des coefficients de transparence et une échelle de couleur aux voxels en fonction de leur densité Hounsfield. Elle ne nécessite donc pas de seuillage mais en contrepartie, demande un temps plus important de traitement des images.

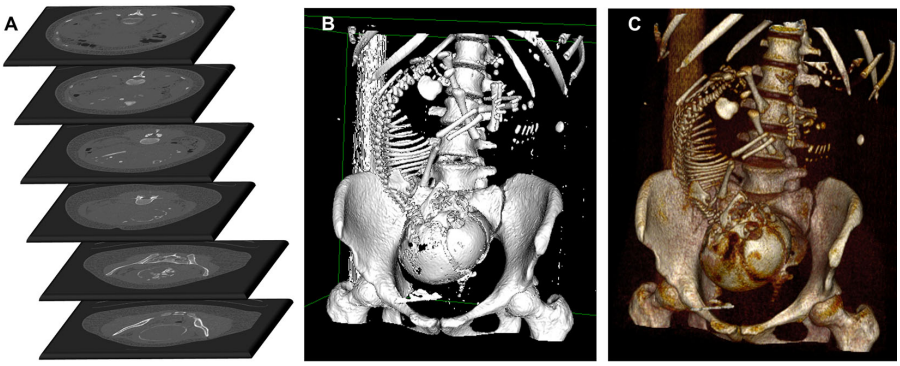


Figure 5 – Deux types de rendus 3D à partir d'acquisitions par tomographie RX (A) ; B : reconstruction surfacique ; C : rendu volumique.

Le premier passage de coupes tomodensitométriques 2D en reconstruction tridimensionnelle 3D se fait dans le cadre de l'imagerie médicale appliquée à la chirurgie crânio-faciale [38-41]. Ce principe est ensuite rapidement appliqué par la même équipe à l'étude des crânes fossiles [18, 42].

De nombreux logiciels de reconstruction 3D, libres ou payants, sont disponibles sur le marché (tableau). La plupart sont des « boîtes noires », c'est-à-dire qu'ils utilisent des algorithmes de reconstruction protégés et dont on ne connaît pas la nature exacte. Certains, notamment ceux basés sur un algorithme de type *Marching Cubes* [43-44], ont une fonction de lissage des surfaces reconstruites dont l'effet esthétique se fait au détriment de la précision.

Les exigences s'accroissant de façon parallèle à la puissance de calcul des micro-ordinateurs qui permettent de traiter des fichiers de données de plus en plus volumineux, allant jusqu'à plusieurs Go pour la micro-tomodensitométrie, les reconstructions 3D atteignent actuellement une grande qualité visuelle apportant dans certains domaines, dont celui de l'archéologie, des résultats spectaculaires.

Paradoxalement, actuellement les applications médicales de l'imagerie 3D sont moins développées que dans d'autres domaines comme celui de la paléoanthropologie et de l'archéologie. La plupart des radiologues considèrent que la 3^{e} dimension n'apporte pas d'intérêt par rapport à la 2D dans le diagnostic radiologique [45]. Les applications de l'imagerie 3D sont néanmoins utiles dans certaines spécialités chirurgicales, notamment à visée reconstructive et en cancérologie pour le suivi et le bilan tumoral [46].

4 Développement d'une chaîne complète de traitement d'imagerie numérique dédiée à l'archéologie

Partant de l'idée de développer sur site, dans le cadre du LabEx des sciences archéologiques de Bordeaux, une chaîne complète allant de l'acquisition tomodensitométrique par rayons X à l'impression 3D par prototypage rapide, nous avons établi un ré-

seau local de collaborations scientifiques réunissant des professionnels de l'archéologie (archéologues, anthropologues, préhistoriens), des informaticiens spécialistes du traitement de l'image numérique et des spécialistes de la tomographie RX (radiologues et physiciens) (figure 6).

Ainsi nous avons pu mettre au point sur le campus universitaire de Bordeaux une chaîne de traitement d'imagerie numérique (CTIN) appliquée aux sciences archéologiques, permettant de contrôler chaque maillon de la chaîne d'analyse des archéomatériaux en imagerie 3D.

- L'acquisition des images se fait soit par CT-scan médicaux de dernière génération, grâce à une collaboration avec le CHU de Bordeaux, soit par micro-CT sur l'appareillage acquis sur un projet région Aquitaine – LabEx des sciences archéologiques. Il s'agit d'un microscanner V|tome|x s GE hébergé dans l'UMS 3626 PLACAMAT (PLateforme Aquitaine de CAractérisation des MATériaux). Cet appareillage de dernière génération est doté d'un double tube (directionnel et à transmission) autorisant des tensions variant entre 180 et 240kV et des acquisitions jusqu'à 2µm. Ces caractéristiques techniques permettent de répondre ainsi au large spectre des archéomatériaux : tissus biologiques (humains, animaux et végétaux – minéralisés, fossilisés ou momifiés), céramique, roches (industrie lithique et minéraux), verre, métal...

- La reconstruction permet la transformation du signal d'acquisition (ou sinogramme) en images 2D ou 3D ; elle se fait actuellement directement dans l'appareillage par des logiciels constructeurs. Les images obtenues sont souvent entachées de bruit : les niveaux de gris présents dans l'image ne correspondent pas toujours à de réelles absorptions de tissus. Cette étape reste la seule hors-contrôle de la CTIN, aussi les membres informaticiens du réseau travaillent actuellement sur les moyens de récupérer directement et de traiter le signal brut d'acquisition, sans passer par les logiciels machines.

- La segmentation permet de « débruiter », c'est-à-dire de nettoyer les images et d'extraire les zones d'intérêt sous la forme d'un ensemble de voxels. Cette phase est réalisée, dans la CTIN, grâce au logiciel TIVMI® (*Treatment and Increased Vision for Medical Imaging*) qui a été spécialement développé par Bruno Dutailly (IE CNRS) au sein du laboratoire PACEA, initialement pour les besoins des recherches en anthropologie biologique et qui maintenant s'applique, en dehors de l'os ancien, à l'imagerie des autres archéomatériaux. Parmi les logiciels 3D disponibles sur le marché, c'est actuellement le seul programme qui intègre de manière automatique la fonction du HMH (*Half Maximum Height*, [47]) étendue à la 3D [48]. Cette méthode initialement développée pour les analyses en 2D, permet de calculer la position exacte de l'interface entre des tissus de densités différentes : air, tissus mous, os, dents. Par rapport à d'autres logiciels de reconstruction 3D libres ou commerciaux utilisant d'autres algorithmes comme par exemple celui des « *Marching Cubes* » [43-44], l'avantage de TIVMI® en termes de précision biométrique a été récemment démontré [49].

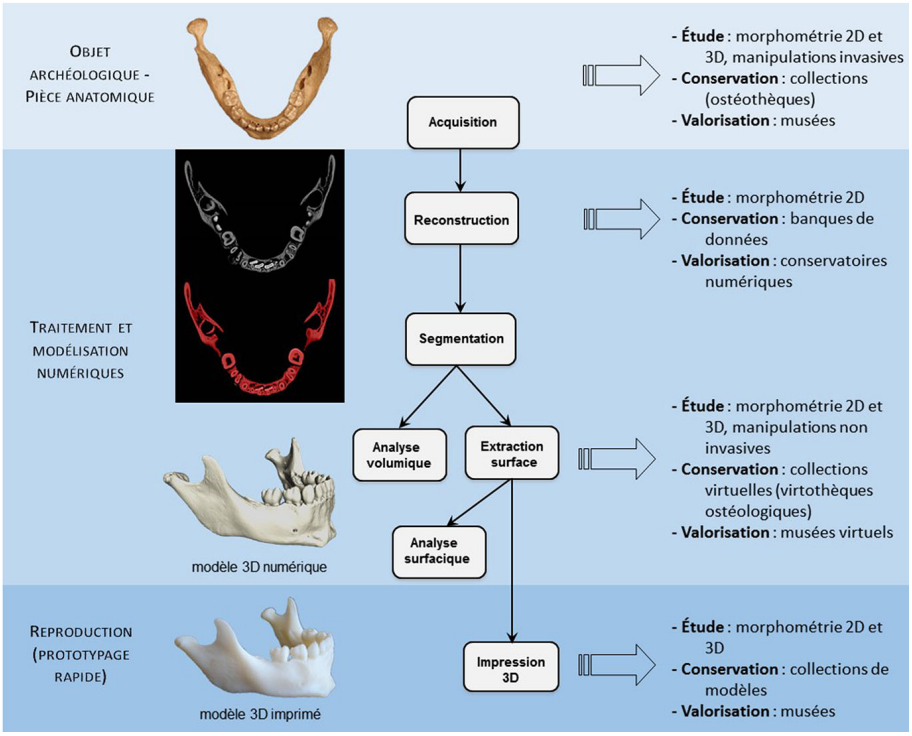


Figure 6 – Schéma de chaîne complète de traitement d'imagerie numérique dédiée à l'archéologie (CTIN).

- Le choix entre des analyses volumiques (étude des structures internes, mesures 1D euclidiennes ou 3D) et une extraction de surface (obtention d'un maillage polygonal pour des mesures géodésiques 1D ou 2D, courbes, angles et surfaces) se fait à ce niveau de la CTIN, dans TIVMI®.

- Le dernier maillon de l'impression 3D est établi en collaboration avec l'UMR 5800 LaBRI (Laboratoire bordelais de recherche en informatique). À partir du maillage polygonal qu'elle reçoit, l'imprimante 3D (Objet Eden 250, précision 16µm) va matérialiser en 3D l'image numérique de l'objet, phase nommée « *real virtuality* » [50-51].

Cette chaîne CTIN a fait l'objet d'un brevet : « Procédé de modélisation d'une pièce formée de tissu osseux » [52] qui vise à développer le concept académique mis en place avec la chaîne de traitement d'imagerie numérique. Pour l'exploitation de ce brevet, les marques verbales et figuratives VIRCOPAL® (VIRtual COllection of PALeospecimens) ont été déposées en octobre 2010. L'objectif de VIRCOPAL® est de développer, à destination de l'enseignement et de la recherche, des reproductions 3D bio-fidèles en résine, de pièces ostéologiques d'intérêts archéologique, paléontologique, anatomique, paléopathologique. Ce brevet a été accompagné par la SATT Aquitaine Science Transfert pour la création d'une cellule de transfert ayant plusieurs cibles :

muséographique (reproductions 3D pour exposition de pièces rares et/ou fragiles), pédagogique (anthropologie/archéologie, médecine) et médicale (chirurgie reconstructrice).

5 Application de l'imagerie 3D à l'anthropologie et à l'archéologie

Les premières applications concernent l'analyse des structures endocrâniennes fossiles, pour comprendre l'évolution cérébrale des mammifères et des primates non humains et humains. Elles sont issues des développements méthodologiques permettant de reconstruire des images 3D à partir de coupes tomodensitométriques 2D, initiés pour les besoins de la chirurgie crânio-faciale par une équipe de l'Université Washington à Saint-Louis, Missouri [38-41]. Avant les années 1980, les limites de la radiologie conventionnelle frustraient tellement les spécialistes, que certains ont pu même préconiser d'enlever, morceau par morceau, les éléments de boîte crânienne jugée de moindre intérêt afin de dégager le moulage endocrânien fossile, plus informatif que le crâne lui-même [53]. Cette procédure quelque peu expéditive a pu heureusement trouver des solutions alternatives moins destructrices grâce à la tomographie et l'imagerie 3D. Parallèlement à l'analyse des structures internes des crânes fossiles sur les coupes tomodensitométriques développée aux Pays-Bas [19-20, 54], l'équipe américaine de l'Université Washington à Saint-Louis, utilise le protocole déjà mis au point pour la chirurgie pour proposer une méthode d'extraction virtuelle du contenu minéralisé des crânes fossiles [18, 42, 55], ce qui introduit la notion de moulage endocrânien virtuel (*virtual endocast*).

L'égyptologie bénéficie peu après, elle aussi, de l'imagerie tridimensionnelle. Ainsi la momie de Tabes, chanteuse du pharaon Amon, offerte au musée des Beaux-Arts de Boston en 1872, qui présente l'un des cartonnages funéraires les plus délicatement peints des collections égyptologiques du musée, a pu bénéficier de cette méthodologie. Sans ouvrir les diverses enveloppes funéraires de Tabes, les reconstructions ont révélé le visage de la momie, l'existence d'un gonflement nucal lié à l'injection sous-cutanée d'une substance de maintien et la conservation des yeux, contrairement à la pratique habituelle des embaumeurs égyptiens d'extraire les globes oculaires et de les remplacer par de la cire [56]. Depuis, l'imagerie tridimensionnelle obtenue à partir d'acquisitions (micro)tomodensitométriques est maintenant couramment utilisée pour l'étude des collections égyptiennes des musées et de façon plus générale pour tous les objets archéologiques ou du patrimoine requérant une analyse non invasive et/ou une valorisation conservatrice. Très récemment, la momie de l'enfant égyptien du musée de Senckenberg qui a bénéficié d'une des premières radiographies par König en 1896 [4] vient d'être à nouveau étudiée grâce à un CT-scan de dernière génération (*dual source*) montrant les progrès technologiques accomplis depuis 120 ans en imagerie RX (figure 2) qui apportent un grand nombre d'informations (garçon de 4-5 ans présentant un *pectus excavatus*, de nombreuses lignes de Harris et une hépatomégalie) [57].

5.1 L'anthropologie biologique dans sa 3e dimension

Le champ d'étude de la paléoanthropologie a connu une véritable révolution avec le développement de l'imagerie tridimensionnelle. Conroy et Vannier prédisent en 1985 [42] que ces méthodes d'imagerie non invasives peuvent avoir des applications importantes dans les recherches paléoanthropologiques futures en permettant aux anthropologues de visualiser et d'analyser des fossiles d'une manière totalement novatrice. Cette prédiction s'est avérée exacte et la réalité est allée même au-delà avec le développement d'une nouvelle approche, nommée (paléo)-anthropologie virtuelle [58]. Les avantages de l'imagerie 3D appliquée à la paléoanthropologie sont multiples : en plus de préserver les spécimens originaux fragiles de toute manipulation, elle ouvre de nouvelles voies d'analyse comme les corrections virtuelles de déformation osseuse (voir notamment [59-61]) ou l'accès à des structures internes inaccessibles comme les oreilles internes, les tables osseuses (par exemple [62-64]). Associée au développement de nouveaux outils mathématiques, l'imagerie tridimensionnelle permet des analyses morphométriques 3D [65] ainsi que la modélisation de différents processus ontogéniques, évolutifs et plus récemment paléopathologiques [66-68].

Nous illustrerons les avancées apportées par l'imagerie tridimensionnelle en trois exemples issus de nos recherches.

5.1.1 L'enfant de Mojokerto et le développement de la cognition chez Homo erectus

Dans le prolongement des travaux pionniers de Conroy et Vannier [18, 42] et de leur application [21], nous avons eu la possibilité de reconstruire l'endocrâne d'un des plus vieux enfants *Homo erectus.* Ces travaux ont permis d'apporter de nouvelles connaissances relatives aux capacités cognitives de ce groupe fossile. En effet, la reconstruction 3D de bonne précision réalisée à partir des données tomodensitométriques du crâne fossile de l'enfant de Mojokerto (1.8 millions d'années [69-70]) a permis d'accéder à la morphologie de certaines structures internes. Ainsi, deux structures invisibles à l'examen direct et aux radiographies standards ont été révélées par la 3D : l'ouverture de la fontanelle antérieure et le stade immature du développement de l'oreille interne (la *fossa subarcuata*). Ces deux observations ont ainsi permis de réviser l'âge au décès de cet enfant. Jusqu'alors estimé à 8 ans, il a pu être rajeuni à 1 an seulement. De plus, la segmentation de la gangue basaltique remplissant l'endocrâne a autorisé son extraction virtuelle ; la cavité crânienne ainsi « nettoyée » a pu être mesurée et le volume endocrânien précisément quantifié. Cette méthode a permis de montrer qu'après seulement un an de développement, le cerveau de ce petit *Homo erectus* avait déjà atteint près de 80 % de sa taille adulte, alors qu'un tel degré de développement n'est atteint en moyenne que vers 4 ans chez un enfant actuel. Ces résultats ont témoigné d'une maturité cérébrale encore précoce à 1,8 million d'années, proche de celle des grands singes. Ces résultats impliquent des différences majeures dans le développement des capacités cognitives entre les *Homo erectus* et les hommes anatomiquement modernes [71] (figure 7).

Ainsi, l'imagerie tridimensionnelle peut apporter de nouvelles réponses originales aux questionnements de la paléoanthropologie portant sur le triptyque principal de la « *life history* » : croissance, longévité et reproduction. Ces questions ont pour but de définir

les acquisitions majeures caractérisant l'évolution humaine : immaturité cérébrale à la naissance, période de croissance prolongée, développement cérébral lent et important, acquisition du langage et de comportements sociaux complexes, capacité d'abstraction et de symbolisme...

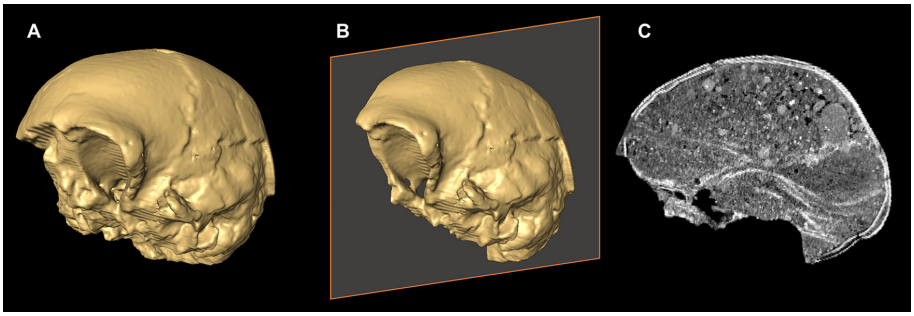


FIGURE 7 – A : reconstruction 3D du crâne de l'enfant *Homo erectus* de Mojokerto ; B : coupe sagittale du crâne ; C : visualisation de la coupe tomodensitométrique dans le plan sagittal montrant le remplissage par une matrice basaltique (reconstruction par le logiciel TIVMI®).

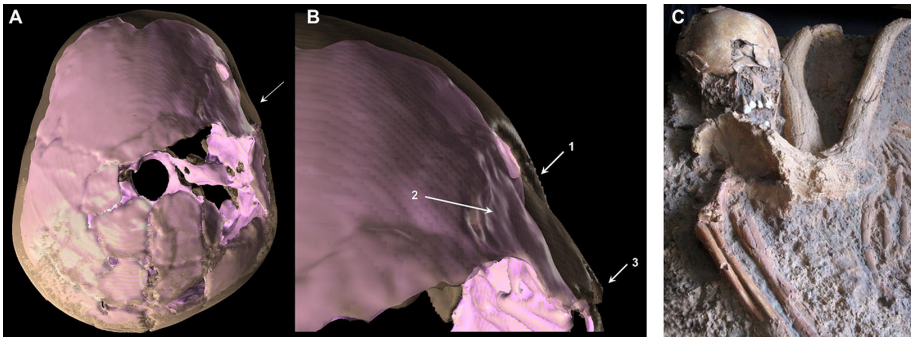


FIGURE 8 – L'adolescent de Qafzeh (Paléolithique moyen, premiers hommes anatomiquement modernes). A : reconstruction 3D du crâne (transparence) et de l'endocrâne (rose) la flèche blanche indique la zone concernée par le traumatisme ; B : détail de la partie pathologique montrant 1 : enfoncement antérieur du fragment frontal fracturé (embarrure), 2 : probable plaie cérébrale, 3 : désengrènement de la suture coronale ; C : sépulture de cet adolescent avec le frontal de cervidé portant ses bois (cliché A.-M. Tillier).

5.1.2 L'adolescent de Qafzeh et le développement cérébral chez les premiers hommes modernes

Dans ce cadre de la « *life history* », la même méthode utilisant l'imagerie tridimensionnelle a apporté de nouvelles données relatives à l'évolution des processus cognitifs et des comportements psychosociaux au cours de l'évolution humaine [72].

Cette recherche collaborative franco-israélienne a porté sur le matériel humain fossile du site de Qafzeh au Proche-Orient, connu pour avoir livré des fossiles représentant les premiers hommes d'anatomie moderne [73], datant de près de 100 ka, découverts dans un contexte culturel de type moustérien [74]. Parmi les 27 individus fossiles

représentés, le crâne du sujet 11 a fait l'objet d'une reconstruction par imagerie tridimensionnelle. Le volume endocrânien de ce sujet dont le stade d'édification dentaire correspond à celui d'un adolescent actuel de 12-13 ans [75], a été précisément mesuré par imagerie tridimensionnelle et comparé à un échantillon contemporain d'*Homo sapiens* d'âge connu de la collection de l'Institut d'anatomie normale de Strasbourg [76]. Il apparaît que ce volume cérébral est comparable à celui d'un enfant actuel de 5-6 ans. Dès lors la question de l'existence de différence de développement cérébral, ou d'une plus grande variabilité de ce développement chez les premiers *Homo sapiens* par rapport aux hommes actuels s'est posée. L'imagerie tridimensionnelle a permis à la fois de poser cette question et d'en apporter la réponse (figure 8). Une légère dépression localisée sur la partie droite de l'os frontal avait été attribuée en 1981 à un traumatisme bénin [77]. Les reconstructions 3D montrent clairement que la fracture du crâne de Qafzeh 11 n'était pas aussi bénigne que l'examen de surface pouvait le laisser croire : elles révèlent que la fracture de l'os frontal était en fait pénétrante (embarrure), le fragment frontal fracturé se désengrenant en partie de la suture avec le pariétal, pénétrant en avant le volume endocrânien et étant responsable d'une plaie méningo-cérébrale dont on voit les traces à la surface de l'endocrâne virtuel. S'il est difficile de conclure sur l'origine intentionnelle ou accidentelle de ce traumatisme, on peut cependant affirmer, contrairement à l'hypothèse initiale d'une blessure sans gravité, qu'il s'agit en fait d'un traumatisme cranio-cérébral, très probablement responsable de conséquences neurologiques, cognitives, de la communication et de la relation sociale pour ce jeune adolescent paléolithique. En effet, les explorations 3D ont permis de localiser précisément les aires cérébrales atteintes dans la région frontale droite (aires 6, 8 et 44) impliquées dans la psychomotricité et dans la communication sociale. Il est très probable que cette jeune personne ait également souffert de troubles de la personnalité, très souvent associés, dans la littérature pédiatrique, à ces traumatismes cranio-encéphaliques frontaux. La faiblesse du volume endocrânien par rapport à l'âge dentaire du sujet correspond donc en fait à un important retard de la croissance cérébrale à mettre en relation avec les séquelles du traumatisme cranio-cérébral. Il est intéressant de rapprocher les probables troubles neurologiques et comportementaux de ce jeune adolescent avec le traitement funéraire particulier qui lui a été réservé, de la part de son groupe d'appartenance. En effet, un frontal de cervidé muni de ses deux bois a été déposé sur la partie supérieure de sa poitrine, près de son visage et en contact étroit avec ses mains. Une telle disposition atteste d'un geste délibéré et plus probablement d'une offrande funéraire.

Il s'agit là d'un exemple unique dans le site de Qafzeh et d'une pratique funéraire exceptionnelle au sein des groupes humains ayant vécu au Paléolithique moyen. Ces témoignages biologiques, mis en évidence par l'imagerie tridimensionnelle, croisés aux données archéologiques sont vraisemblablement le reflet d'un comportement social déjà complexe au sein de ce groupe de chasseurs-cueilleurs paléolithiques. Ils permettent de nous interroger sur les étapes évolutives de mise en place des comportements d'altruisme et de compassion au sein des communautés humaines préhistoriques.

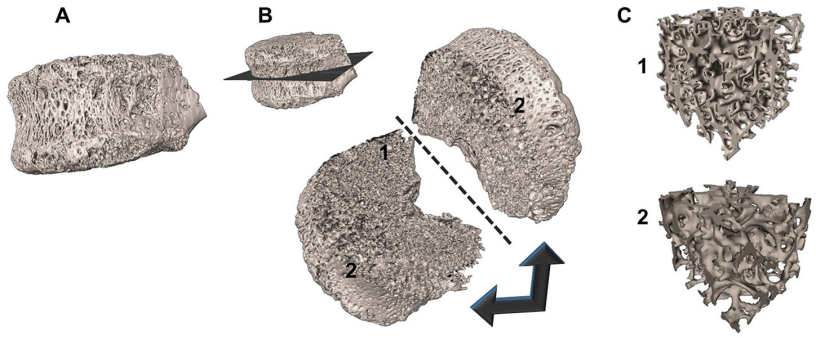


FIGURE 9 – A : reconstruction 3D d'une 3ème vertèbre lombaire d'un enfant âgé d'environ 5 ans (site de Dja'de-El-Mughara, Néolithique ancien pré-domestication, Syrie) présentant des signes d'infection tuberculeuse ; B : section horizontale virtuelle de la vertèbre (acquisition micro-CT 3µm) montrant une lésion focale caractérisée à la partie antéro-latérale gauche du corps vertébral ; C : extraction virtuelle agrandie de la microarchitecture trabéculaire, 1 : normale et 2 : pathologique caractérisée par une raréfaction du nombre des trabécules accompagnée d'un épaississement, témoignant d'une infection par voie hématogène (reconstruction H. Coqueugniot, CNRS).

De plus, l'imagerie tridimensionnelle confirme par cet exemple son intérêt de décryptage paléopathologique, jouant le rôle d'une nouvelle Pierre de Rosette dans cette fonction d'identification [78]. L'étude suivante procède de la même démarche de reconnaissance.

5.1.3 L'enfant néolithique de Dja'de et la tuberculose dans le Croissant fertile

La paléopathologie, à l'interface entre anthropologie, archéologie et médecine, permet d'intégrer des nouveaux proxys dans l'approche de la « *life history* ». L'étude de pathologies impactant la croissance s'inscrit dans la logique du compromis adaptatif, base de la « *life history* » : la mobilisation des ressources énergétiques de l'organisme en croissance face à une pathologie ne peut se faire qu'au détriment des ressources énergétiques allouées aux processus de croissance et de développement. La reconnaissance de l'état pathologique est donc une des facettes de l'étude anthropologique, également accessible à l'imagerie tridimensionnelle. La tuberculose est très répandue à certaines époques, notamment au XIX^{e} siècle et au début du XX^{e} siècle, c'est-à-dire à la période historique de constitution des grandes collections anthropologiques. C'est une infection qui survient principalement dans l'enfance et dont l'impact général peut influer sur la croissance, d'où l'intérêt de la reconnaître à un stade mineur ou précoce dans ces séries de référence, comme sur les spécimens archéologiques.

Nous avons analysé par imagerie tri-dimensionnelle la micro-architecture vertébrale de quelques spécimens venant du Néolithique PPNB ancien de Syrie (site de Dja'de el Mughara, 10 450 - 10 150 BP cal [79]) pour lequel la question de la présence ancienne de la tuberculose a été posée [80]. Une vertèbre lombaire d'un sujet immature âgé d'environ 5 ans présentant des lésions très discrètes sur sa partie antérieure a fait l'objet d'acquisitions par microtomodensitométrie à une résolution de 3 microns dans les trois plans de l'espace. En contraste avec ces changements mineurs et subjectifs, la

reconstruction 3D met clairement en évidence les changements microarchitecturaux sur la partie antéro-latérale du corps, visibles en section le long d'un axe horizontal. La microarchitecture est focalement réorganisée. L'organisation générale verticale des travées est modifiée et certains critères morphométriques révèlent une perte trabéculaire dans la zone des lésions. Ces lésions sont interprétées ici comme étant la première étape du processus de l'infection tuberculeuse de la colonne vertébrale (figure 9). L'emplacement de ces lésions correspond effectivement au trajet anatomique des branches équatoriales de l'artère vertébrale, branche de l'aorte, pour alimenter le corps vertébral par ses deux faces antéro-latérales. On peut donc démontrer ici grâce à l'imagerie 3D qu'il s'agit d'une infection précoce du corps vertébral par voie hématogène [68]. Les analyses moléculaires (aDNA et acides mycoliques) ont confirmé l'infection par *Mycobacterium tuberculosis* [80]. L'imagerie 3D confirme ici son fort potentiel de traduction de signes paléopathologiques exprimés à l'échelle microarchitecturale.

5.2 L'archéologie dans la 3^{e} dimension

Cette méthodologie d'étude virtuelle en 3 dimensions intéresse également d'autres acteurs du domaine des sciences archéologiques. Quelques exemples en illustrent les principales applications à divers archéomatériaux.

Les industries lithiques préhistoriques bénéficient depuis peu de cette méthodologie : elle permet notamment de réaliser des remontages virtuels, de recréer des éclats manquants, d'explorer finement les caractéristiques de la percussion pour une meilleure compréhension des processus de débitage. Les silex virtuels sont interactifs, ils peuvent être observés, manipulés, mesurés, analysés, partout dans le monde, sans toucher aux matériaux originaux tout en s'affranchissant du problème du caractère parfois subjectif des dessins de silex. Les modèles peuvent être facilement distribués en ligne ou partagés via des musées virtuels ou imprimés en 3D comme s'ils étaient dans la main du chercheur [34]. Dans le domaine de la céramologie préhistorique et antique, l'analyse micro-tomodensitométrique de tessons peut permettre d'identifier la morphologie ou l'orientation des pores dans la céramique qui sont des indices précieux pour la connaissance des technique de modelage [36]. En paléométallurgie, les analyses d'images micro-scanner d'outils peuvent permettre, par exemple, d'obtenir des informations sur la fabrication ou l'utilisation d'armes en bronze. Les causes de cassures peuvent être identifiées, les techniques de moule et certains défauts de fonderie mis en évidence [32]. En égyptologie, en dehors des momies, les applications se font dans l'étude des scarabées amulettes [81]. Plus récemment ces méthodes trouvent une application dans l'analyse des textes anciens, provenant de rouleaux de papyrus ou parchemin très endommagés et très fragiles impossibles à dérouler sans destruction et donc inaccessibles en dehors de l'imagerie tridimensionnelle. Une méthode originale, permet l'ouverture virtuelle des rouleaux. Ces méthodes ont été testées sur deux rouleaux calcinés de papyrus d'Herculanum dont l'encre n'était pas visible [35] et très récemment avec succès sur un parchemin contemporain des manuscrits de la Mer Morte [82]. Ce parchemin hébraïque découvert en Israël en 1970 sur les rives de la mer Morte toujours sous forme d'un fragment de rouleau calciné dont l'étude était totalement impossible jusqu'à présent et daté aux alentours du III^{e} siècle de notre ère,

vient de dévoiler ses secrets grâce à cette nouvelle méthode de « *virtual unwrapping* ». Le texte identifié est très proche de celui d'une Bible hébraïque médiévale, dite texte Masorétique. Il s'agirait de la plus ancienne version du Lévitique, 3^{e} livre de la Torah [82].

6 Retour aux sources : application de l'imagerie 3D conçue pour l'archéologie à la chirurgie reconstructrice

Une des applications principales de l'imagerie tridimensionnelle en chirurgie est celle de la chirurgie crânienne et maxillo-faciale pour laquelle des méthodes 3D spécifiques ont été développées [38-41], ces mêmes méthodes étant transférées rapidement au domaine de la paléoanthropologie [18, 42].

Les indications chirurgicales qui nécessitent l'utilisation d'une chaîne complète allant jusqu'à l'impression 3D concernent la chirurgie des malformations crânio-faciales (crâniosténoses, fentes palatines et autres malformations faciales), les reconstructions de la face osseuse (post-traumatiques, oncologiques, esthétiques) et l'implantologie dentaire. Les indications en chirurgie orthopédique (hanche, genou), permettant l'impression de prothèses ou d'implants correspondant à la propre anatomie du patient se développent progressivement. L'impression 3D est destinée à fournir soit des pièces en titane implantées dans le tissu osseux du patient, soit des pièces en résine servant de gabarit et de guide de coupe permettant de préparer l'intervention en amont et de gagner ainsi du temps opératoire en réduisant les risques de complications.

L'expérience de l'imagerie tridimensionnelle que nous avons développée dans notre discipline anthropologique a pu être appliquée à la chirurgie reconstructrice faciale. Notre habitude des problèmes de fragmentation osseuse et de reconstruction des parties squelettiques manquantes dans le contexte archéologique, nous a permis de contribuer à un succès opératoire. Un grave traumatisme de la face ayant privé un patient d'une partie de sa mandibule, nous avons réalisé une reconstruction de cette partie manquante par symétrie et réalisé une impression 3D du fragment manquant. Celui-ci a servi de gabarit pré- et per-opératoire et permis de gagner 3 heures d'intervention (figure 10). Ainsi, dans ce cas, les méthodes développées pour l'archéologie ont pu être utiles à la chirurgie.

7 Conclusion : de la paléo-radiologie à la paléo-imagerie

Les applications « archéométrique » des rayons X ont fait émerger le terme de paléoradiologie, qui ne traite pas de la radiologie à ses débuts mais définit l'application du rayonnement X à l'étude de matériaux bio-archéologiques. Chhem [45] la définit comme une méthode d'étude des momies et des restes osseux anciens, étendue aux autres matériaux biologiques anciens (paléobotanique). Il la divise en deux grands domaines : la paléoradiologie anatomique, recouvrant l'ensemble des études morphologiques (momies, hommes fossiles) et la paléoradiologie diagnostique, qui est la science de la détection radiologique des maladies que l'on peut démontrer sur des restes humains et animaux des périodes anciennes, reprenant ainsi la définition de la paléopathologie par Ruffer [83].

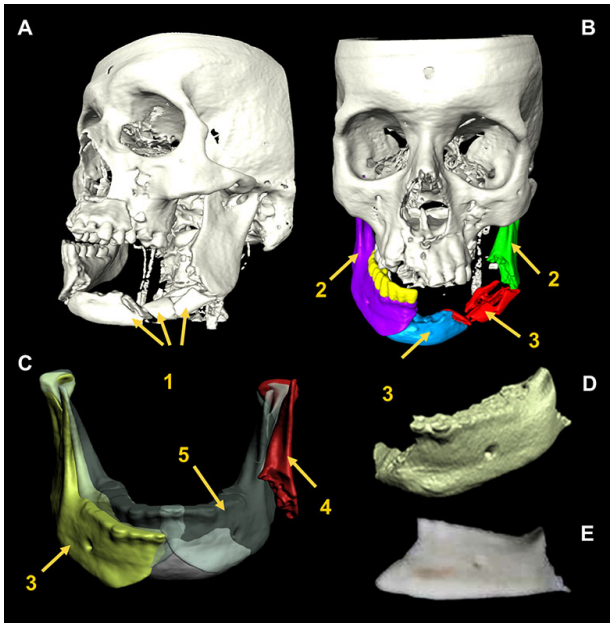


Figure 10 – Application de la CTIN à la chirurgie reconstructrice. A : reconstruction 3D à partir de l'acquisition tomodensitométrique du crâne du blessé avec mise en évidence de fragmentation de la mandibule liée à la pénétration du projectile (1) ; B : segmentation des différents éléments mandibulaires et différenciation des parties viables (2) et des fragments devant faire l'objet d'une exérèse (3) ; C : superposition à l'échelle des fragments de mandibule conservés (4) après ablation virtuelle des fragments non viables et d'une reconstruction de la mandibule incluant la pièce manquante crée par symétrie (5) ; D : reconstruction 3D du fragment manquant aux dimensions exactes d'origine ; E : impression 3D du fragment en résine bio-compatible.

Le terme de paléoradiologie a en fait été créé en 1987 par Derek Notman [84], un radiologue de Mineapolis, pour désigner les méthodes radiologiques utilisées sur le terrain, dans le cadre d'une mission en Arctique à la recherche des victimes de l'expédition Franklin (1845-1848). Le capitaine John Franklin, officier de la Royal Navy, était un explorateur reconnu des régions arctiques et l'expédition polaire qu'il devait effectuer avec deux navires et 128 hommes devait être la dernière de sa carrière. Ce qui fut le cas, mais pas de la manière espérée. Les navires furent bloqués dans les glaces de l'archipel canadien, et il n'y eu aucun survivant de cette expédition. Une mission anthropologique (Université d'Alberta) organisée dans les années 1980 à la recherche des victimes a mobilisé le radiologue américain et son matériel radiologique portatif pour réaliser des clichés des corps congelés sur le terrain arctique. La « paléoradiologie » est apparue dans ce contexte. De façon plus générale, la paléoradiologie se conçoit actuellement comme l'application des rayons X à l'étude des restes bioarchéologiques [45]. Récemment, d'autres auteurs [85] ont introduit le terme nouveau de « *paleoimaging* ». Ils développent une réflexion poussée sur l'utilisation de l'ensemble des méthodes produisant des images en contexte archéologique et proposent le concept d'imagerie multimodale, permettant de dépasser les limites de chaque méthode d'imagerie uni-modale (photographie, radiologie conventionnelle et numérique,

tomodensitométrie et microtomographie RX, imagerie par résonance magnétique, endoscopie) et de combiner 2D et 3D dans le cadre d'une approche multidimensionnelle.

Cette nouvelle approche transdisciplinaire de la paléo-imagerie qui s'applique aux recherches anthropologiques et archéologiques, utilise donc l'ensemble des modalités non-destructives d'acquisition d'images et de leur représentation (multimodale et multidimensionnelle) s'exprime à la fois sur le terrain et en laboratoire, fonctionne de manière diachronique (sans focus chronologique, de la préhistoire aux périodes contemporaines) et holistique en contextualisant l'objet dans son environnement archéologique. C'est à ce titre que la paléo-imagerie doit rejoindre le panel des méthodes de l'archéométrie.

Remerciements

J'adresse mes remerciements les plus chaleureux à mes collègues de l'équipe d'imagerie : Olivier Dutour, Bruno Dutailly et Pascal Desbarats, co-inventeurs du brevet VIRCOPAL®.

Références

[1] W.R. Röntgen, Über eine neue Art von Strahlen. Sitzungsberichte der physikalish-Medizinischen Gesellschaft zu Würzburg, Springer Verlag, Vorläufige Mittheilung. 2. Aufl. Würzburg, 1896.

[2] W.R. Röntgen, On a new kind of rays. Nature. 53, 274-276, 1896.

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

[4] W. König, 14 Photographien mit Röntgen-Strahlen, aufgenommen im Physikalischen Verein, zu Frankfurt a. M., Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1896.

[5] D. Gorjanovic-Kramberger, Der paläolithische Mensch und seine Zeitgenossen aus dem Diluvium von Krapina in Kroatien (Nachtrag, als zweiter Theil). Mittheilungen der Anthropologischen Gesellschaft in Wien. 32, 189–216, 1902.

[6] F.O. Walkhof, « Sechste Lieferung : die diluvialen menschelichen Kiefer Belgiens und ihre pithekoiden Eigenschaften » dans Menshenaffen (Anthropomorphae) Studien über Entwickelung und Schaädelbau, ed. E. Selenka, C.W. Kreidel's Verlag, Wiesbaden. p. 373-415, 1903.

[7] R.L. Moodie, Roentgenologic studies of Egyptian and Peruvian mummies, University of Chicago Press, Chicago, 66 pages, 1931.

[8] M.F. Skinner, G.H. Sperber, Atlas of radiographs of early man, Alan R. Liss, New York, 346 pages, 1982.

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

[10] A.M. Cormack, Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. Journal of Applied Physics. 34, 2722–2727, 1963.

[11] A.M. Cormack, Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. II. Journal of Applied Physics. 35, 2908–2913, 1964.

[12] G.N. Hounsfield, A method and apparatus for examination of a body by radiation such as X or Gamma, The patent office, London, England, Pat. Spec., n° 1283915, 1972.

[13] G.N. Hounsfield, The E.M.I. scanner. Proceedings of the Royal Society London Series B : Biological Sciences. 195, 281–289, 1977.

[14] P.K. Lewin, D.C.F. Harwood-Nash, Computerized axial tomography in medical archeology. Paleopathology Newsletter. 17, 8-9, 1977.

[15] D.C.F. Harwood-Nash, Computed tomography of ancient Egyptian mummies. Journal of Computer Assisted Tomography. 3, 768-773, 1979.

[16] W.L. Jungers, R.J. Minns, Computed tomography and biomechanical analysis of fossil long bones. American Journal of Physical Anthropology. 50, 285–290, 1979.

[17] J.R. Tate, C.E. Cann, High-resolution computed tomography for the comparative study of fossil and extant bone. American Journal of Physical Anthropology. 58, 67–73, 1982.

[18] G.C. Conroy, M.W. Vannier, Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high resolution computed tomography. Science. 226, 456–458, 1984.

[19] J. Wind, Computerized x-ray tomography of fossil hominid skulls. American Journal of Physical Anthropology. 63, 265–282, 1984.

[20] F.W. Zonneveld, J. Wind, « High-resolution computed tomography of fossil hominid skulls : a new method and some results » dans Hominid Evolution : Past, Present and Future, ed. P.V. Tobias, Alan R. Liss, New York. p. 427–436, 1985.

[21] G.C. Conroy, M.W. Vannier, P.V. Tobias, Endocranial features of *Australopithecus africanus* revealed by 2- and 3-D computed tomography. Science. 247, 838-841, 1990.

[22] J.C. Elliott, S.D. Dover, X-ray microtomography. Journal of Microscopy. 126, 211-213, 1982.

[23] L.A. Feldkamp, S.A. Goldstein, A.M. Parfitt, Jesion G., M. Kleerekoper, The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography. Journal of Bone and Mineral Research, 4, 3–11, 1989.

[24] J.L. Kuhn, S.A. Goldstein, L.A. Feldkamp, R.W. Goulet, G. Jesion, Evaluation of a microcomputed tomography system to study trabecular bone structure. Journal of Orthopaedic Research. 8, 833–842, 1990.

[25] R. Müller, P. Rüegsegger, Morphological validation of the 3D structure of non-invasive bone biopsies. Abstracts 10th Int. Workshop on Bone Densitometry. Bone and Mineral. 25, 8, 1994.

[26] P. Rüegsegger, B. Koller, R. Müller, A microtomographic system for the nondestructive evaluation of bone architecture. Calcified Tissue International. 58, 24–29, 1996.

[27] Y. Chaimanee, D. Jolly, M. Benammi, P. Tafforeau, D. Duzer, I. Moussa, J.J. Jaeger, A Middle Miocene hominoid from Thailand and orangutan origins. Nature. 422, 61–65, 2003.

[28] D.G. Gantt, J. Kappleman, R.A. Ketcham, M.E. Alder, T.H. Deahl, 3D approach to interpret enamel thickness and volume. American Journal Physical Anthropology, 120, 99, 2003.

[29] R.T. Kono, Molar enamel thickness and distribution patterns in extant great apes and humans : new insights based on a 3-dimensional whole crown perspective. Anthropological Science. 112, 121–146, 2004.

[30] A.J. Olejniczak, F.E Grine, High-resolution measurement of Neandertal tooth enamel thickness by micro-focal computed tomography. South African Journal of Science, 101, 219–220, 2005.

[31] A.J. Olejniczak, F.E Grine, Assessment of the accuracy of dental enamel thickness measurements using microfocal X-ray computed tomography. Anatomical Record, 288A, 263–275, 2006.

[32] M. Mödlinger, Micro-X-ray computer tomography in archaeology : analyses of a Bronze Age sword. Insight, 50, 1-3, 2008.

[33] S. Coubray, V. Zech-Matterne, A. Mazurier, The earliest remains of a Citrus fruit from a western Mediterranean archaeological context ? A microtomographic-based re-assessment. Comptes Rendus de Palevol. 9, 277-282, 2010.

[34] R.L. Abel, S. Parfitt, N. Ashton, S.G. Lewis, B. Scott, C. Stringer, Digital preservation and dissemination of ancient lithic technology with modern micro-CT. Computer Graphics. 35, 878-884, 2011.

[35] W.B. Seales, J. Griffioen, R. Baumann, M. Field, Analysis of Herculaneum papyri with x-ray computed tomography, in International Conference on Nondestructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage, Florence, Italy, 2011.

[36] W.A. Kahl, B. Ramminger, Non-destructive fabric analysis of prehistoric pottery using high-resolution X-ray microtomography : a pilot study on the late Mesolithic to Neolithic site Hamburg- Boberg. Journal of Archaeological Science. 39, 2206-2219, 2012.

[37] M. Levoy, Display of Surfaces from Volume Data. IEEE Computer Graphics and Applications. 8, 29-37, 1988.

[38] M.W. Vannier, J.L. Marsh, J.O. Warren, Three-dimensional computer graphics for craniofacial surgical planning and evaluation. Computer Graphics. 17, 263–273, 1983.

[39] M.W. Vannier, J. Marsh, J. Warren, J. Barbier, Three dimensional computer aided design of craniofacial surgical procedures. Diagnostic Imaging. 5, 36–43, 1983.

[40] M.W. Vannier, M.H. Gado, J.L. Marsh, Three-dimensional display of intracranial soft-tissue structures. American Journal of Neuroradiology. 4, 520 –521, 1983.

[41] M.W. Vannier, J.L. Marsh, J.O. Warren, Three dimensional CT reconstruction images for craniofacial surgical planning and evaluation. Radiology. 150, 179 –184, 1984.

[42] G.C. Conroy, M.W. Vannier, « Endocranial volume determination of matrix-filled fossil skulls using high-resolution computed tomography » dans Hominid Evolution : Past, Present and Future, ed. P.V. Tobias, Alan R. Liss, New York. p. 419–426, 1985.

[43] W.E. Lorensen, H.E. Cline, Marching cubes : A high resolution 3D surface construction algorithm. Computer Graphics. 21, 163-169, 1987.

[44] E. V. Chernyaev. Marching Cubes 33 : construction of topologically correct isosurfaces. Technical Report CERN CN 95–17, CERN, 1995.

[45] R.K. Chhem, « Paleoradiology : history and new developments » dans Paleoradiology : Imaging Mummies and Fossils, eds. R.K. Chhem, D.R. Brothwell, Springer, Berlin, Heidelberg. p. 1-14, 2008.

[46] D.F. Yankelevitz, A.P. Reeves, W.J. Kostis, B. Zhao, C.I. Henschke, Small Pulmonary Nodules : Volumetrically Determined Growth Rates Based on CT Evaluation. Radiology. 217, 251-256, 2000.

[47] 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.

[48] 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.

[49] 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.

[50] 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.

[51] 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.

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

[53] L. Radinsky L., « Endocasts and studies of primate brain evolution » dans The functional and evolutionary biology of primates, R. Tuttle, Aldine-Atherton, Chicago, New York. p 175–184, 1972.

[54] J. Wind, F. Zonneveld, « Radiology of fossil hominid skulls » dans Hominid Evolution : Past, Present and Future, ed. P.V. Tobias, Alan R. Liss, New York. p. 437–442, 1985.

[55] M.W. Vannier, G.C. Conroy, J.L. Marsh, R.H. Knapp, Three-dimensional cranial surface reconstructions using high-resolution computed tomography. American Journal of Physical Anthropology. 67, 299-311, 1985.

[56] M. Marx, S.H. D'Auria, Three-Dimensional CT reconstruction of an ancient human Egyptian mummy. American Journal of Roentgenology. 150, 147-149, 1988.

[57] S. Zesch, S. Panzer, W. Rosendahl, J.W. Nance Jr., S.O. Schönberg, T. Henzler, From first to latest imaging technology : Revisiting the first mummy investigated with X-ray in 1896 by using dual-source computed tomography. European Journal of Radiology Open. 3, 172-181, 2016.

[58] G. Weber, Virtual anthropology (VA) : a call for glasnost in paleoanthropology. The Anatomical Record (New Anat). 265, 193-201, 2001.

[59] A.D. Kalvin, D. Dean, J.J. Hublin, M. Braun, « Visualization in anthropology : Reconstruction of human fossils from multiple pieces » dans Proceedings of IEEE Vizualization 92, eds. A.E. Kaufman, G.M. Neilson, IEEE Computer Society Press. p. 404-410, 1992.

[60] C.P.E.. Zollikofer, M.S. Ponce de León, R.D. Martin, P. Stucki, Neanderthal computer skulls. Nature. 375, 283-285, 1995.

[61] M.S. Ponce de Leon, C.P.E. Zollikofer, New evidence from Le Moustier 1 : Computer-assisted reconstruction and morphometry of the skull. Anatomical Record. 254, 474–489, 1999.

[62] F.W. Zonneveld, S. Lobregt J.C.H van der Meulen, J.M. Vaandrager, Three-dimensional imaging in craniofacial surgery. World Journal of Surgery. 13, 328-342, 1989.

[63] J.J. Hublin, F. Spoor, M. Braun, F. Zonneveld, S. Condemi, A late Neanderthal associated with Upper Palaeolithic artefacts. Nature. 381, 224-226, 1996.

[64] F. Spoor, B. Wood, F. Zonneveld, Implications of early hominid labyrinthine morphology for evolution of human bipedal locomotion. Nature. 369, 645–648, 1994.

[65] K. Harvati, Models of shape variation between and within species and the Neanderthal taxonomic position : a 3D geometric morphometrics approach based on temporal bone morphology. British Archaeological Reviews International Series. 1049, 25-30, 2002.

[66] M.S. Ponce de Leon, C.P.E. Zollikofer, Neanderthal cranial ontogeny and its implications for late hominid diversity. Nature. 412, 534-538, 2001.

[67] P. Mitteroecker, P. Gunz, M. Bernhard, K. Schaefer, F.L. Bookstein, Comparison of cranial ontogenetic trajectories among great apes and humans. Journal of Human Evolution. 46, 679–698, 2004.

[68] H. Coqueugniot, B. Dutailly, P. Desbarats, B. Boulestin, I. Pap, I. Szikossy, O. Baker, M. Montaudon, M. Panuel, K. Karlinger, B. Kovács, L.A. Kristóf, G. Pálfi, O. Dutour, Three-dimensional imaging of past skeletal TB : from lesion to process. Tuberculosis. 95, S73-S79, 2015.

[69] C.C. Swisher 3rd, G.H Curtis, T. Jacob, A.G. Getty, A Suprijo, Widiasmoro, Age of the earliest known hominids in Java, Indonesia. Science. 263, 118-121, 1994.

[70] O. Huffman, Geologic context and age of the Perning/Mojokerto Homo erectus, East Java. Journal of Human Evolution. 40, 353-362, 2001.

[71] 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.

[72] H. Coqueugniot, O. Dutour, B. Arensburg, H. Duday, B. Vandermeersch, A.-m. Tillier, Earliest cranio-encephalic trauma from the Levantine middle Palaeolithic : 3D reappraisal of the Qafzeh 11 skull, consequences of pediatric brain damage on individual life condition and social care. PLoS ONE. 9(7), e102822, 2014.

[73] B. Vandermeersch, Les hommes fossiles de Qafzeh. Editions CNRS, Cahiers de Paléoanthropologie, Paris, 319 pages, 1981.

[74] H. Valladas, J.L. Reyss, J.L. Joron, G. Valladas, O. Bar Yosef, B. Vandermeersch, Thermoluminescence dating of Mousterian "Proto-cro-magnon" remains from Israel and the origin of Modern man. Nature. 331, 614- 616, 1988.

[75] A.-m. Tillier, Les enfants moustériens de Qafzeh. Interprétation phylogénétique et paléoauxologique. Editions CNRS, Cahiers de Paléoanthropologie, Paris, 239 pages, 1999.

[76] 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.

[77] J. Dastugue, Pièces pathologiques de la nécropole moustérienne de Qafzeh. Paléorient. 7, 135-140, 1981.

[78] Y. Chandrashekkhar, J. Narula, Medical Imaging : The New Rosetta Stone. Journal of American College of Cardiology : Cardiovascular Imaging. 4, 440-443, 2011.

[79] E. Coqueugniot, « Dja'de (Syrie), un village à la veille de la domestication (seconde moitié du IX^{e} millénaire av. J.-C.) » dans Premiers paysans du monde Naissances des agricultures, ed. J. Guilaine, Errance, collection des Hespérides, Paris. p. 61-79, 2000.

[80] O. Baker, O.Y-C Lee, H.H-T. Wu, G.S. Besra, D.E. Minnikin, G. Llewellyn, C.M. Williams, F. Maixner, N. O´Sullivan, A. Zink, B. Chamel, R. Khawam, E. Coqueugniot, D. Helmer, F. Le Mort, L. Gourichon, B. Dutailly, G. Pálfi, H. Coqueugniot, O. Dutour, Human tuberculosis predates domestication in ancient Syria. Tuberculosis. 95, S4-S12, 2015.

[81] R.J. Jansen, M. Poulus, H. Venema, J. Stoker, High-Resolution Spiral CT of Egyptian Scarabs. RadioGraphics. 22, 63-66, 2002.

[82] W.B. Seales, C.S. Parker, M. Segal, E. Tov, P. Shor, Y. Porath, From damage to discovery via virtual unwrapping : Reading the scroll from En-Gedi. Science Advances. 2, e1601247, 2016.

[83] M.A. Ruffer, Studies in Palaeopathology in Egypt. The Journal of Pathology and Bacteriology. 18, 149-162, 1913.

[84] D.N.H. Notman, L. Anderson, O.B. Beattie, R. Amy, Arctic Paleoradiology : Portable Radiographic Examination of Two Frozen Sailors from the Franklin Expedition (1845-1848). Amercian Journal of Roentgenology. 149, 347-350, 1987.

[85] R.G. Beckett, G.J. Conlogue, Paleoimaging, Field Applications for Cultural Remains and Artifacts, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 424 pages, 2010.