



HAL
open science

Apport de l'imagerie tridimensionnelle à l'étude des maladies des populations du passé

Hélène Coqueugniot, Olivier Dutour

► To cite this version:

Hélène Coqueugniot, Olivier Dutour. Apport de l'imagerie tridimensionnelle à l'étude des maladies des populations du passé. Les sciences archéologiques à l'ère du virtuel, Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques, 2023, <10.4000/books.cths.16743>. <hal-04330061>

HAL Id: hal-04330061

<https://hal.science/hal-04330061v1>

Submitted on 7 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



Hélène Coqueugniot, Olivier Dutour, Jacques Jaubert et Patrick Paillet (dir.)

Les sciences archéologiques à l'ère du virtuel

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

Apport de l'imagerie tridimensionnelle à l'étude des maladies des populations du passé

Contribution of Three-Dimensional Imaging to the Study of Diseases in Past Populations

Hélène Coqueugniot et Olivier Dutour

DOI : 10.4000/books.cths.16743

Éditeur : Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

Lieu d'édition : Paris

Année d'édition : 2023

Date de mise en ligne : 17 mai 2023

Collection : Actes des congrès nationaux des sociétés historiques et scientifiques

EAN électronique : 9782735509270



<http://books.openedition.org>

Référence électronique

COQUEUGNIOT, Hélène ; DUTOUR, Olivier. *Apport de l'imagerie tridimensionnelle à l'étude des maladies des populations du passé* In : *Les sciences archéologiques à l'ère du virtuel* [en ligne]. Paris : Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques, 2023 (généré le 08 septembre 2023). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/cths/16743>>. ISBN : 9782735509270. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.cths.16743>.

Ce document a été généré automatiquement le 8 septembre 2023.

Apport de l'imagerie tridimensionnelle à l'étude des maladies des populations du passé

Contribution of Three-Dimensional Imaging to the Study of Diseases in Past Populations

Hélène Coqueugnot et Olivier Dutour

Introduction : 125 ans d'histoire d'imagerie radiologique, des rayons X au CT-scan

- 1 L'application des méthodes radiologiques à l'étude des restes humains et animaux des périodes anciennes est contemporaine de la naissance de la paléopathologie en tant que discipline. En effet, c'est dès 1896 que les premières radiographies de momies égyptiennes sont réalisées, trois ans seulement après l'invention du terme de paléopathologie¹ et quelques mois après la description de ce nouveau rayonnement électromagnétique. Rarement dans l'histoire des sciences la découverte d'une nouvelle méthode d'observation de la nature a trouvé ses applications aussi rapidement.
- 2 En novembre 1895, le physicien allemand Wilhem Conrad Röntgen, de l'université de Würzburg, découvre un rayonnement inconnu, les « rayons X », qui ont la capacité de pénétrer de nombreux matériaux et d'impressionner les plaques photographiques. Il publie ses résultats un mois plus tard². Cette capacité des rayons X à traverser la matière, y compris le corps humain, et à révéler ses structures internes représente une véritable révolution pour les sciences médicales. En mars 1897, le médecin français Antoine Béclère crée à Paris le premier enseignement de radiologie médicale et le premier service hospitalier de radiologie.
- 3 Les sciences archéologiques bénéficient de cette découverte dans le même temps. En février 1896, un mois seulement après la première application clinique, Alexander Dedekind, un égyptologue autrichien, effectue les premières radiographies d'une

momie d'ibis au musée d'histoire naturelle de Vienne³. Au mois de mars 1896, le physicien allemand Walter König publie un livre présentant 14 radiographies de momies animales et humaines égyptiennes du musée Senckenberg, à Francfort⁴. C'est donc à peine trois mois après leur découverte que la communauté scientifique et le public sont sensibilisés à l'intérêt des rayons X pour l'archéologie.

- 4 On peut s'étonner que Marc Armand Ruffer, fondateur de la paléopathologie en tant que science autonome⁵, ne mentionne pas l'intérêt des radiographies pour explorer les maladies des momies égyptiennes, alors qu'il développe de nombreuses autres méthodes analytiques⁶. Cela s'explique sans doute par sa disparition prématurée en 1917. En revanche, Marcel Baudouin, médecin et préhistorien français, insiste dès 1923 sur l'intérêt de la radiographie en paléopathologie⁷. En 1929, un autre médecin français, Léon Pales, illustre sa thèse en paléopathologie par de nombreuses radiographies d'os pathologiques humains et animaux⁸. En 1931, le paléopathologiste américain Roy Lee Moodie publie une monographie entièrement consacrée à l'étude radiographique des momies égyptiennes et péruviennes⁹ et illustre par de nombreux exemples le caractère décisif de l'utilisation de la radiologie. Cependant, il souligne dès cette époque le problème de superposition, qui limite la visualisation des différentes structures traversées par les rayons X. Ce même problème, rencontré par les cliniciens, sera résolu un demi-siècle plus tard par la tomодensitométrie, méthode permettant de s'affranchir des superpositions par les coupes tomographiques. Introduite en 1971 dans le domaine médical, la tomодensitométrie par ordinateur (CT) a été appliquée quelques années plus tard aux études de momies¹⁰, notamment à des fins paléopathologiques¹¹. Initialement limitée à la visualisation de coupes, l'imagerie de la momie s'est ensuite enrichie d'images 3D, la révolution numérique initiée dans les années 1980 ayant permis un développement considérable de l'acquisition et du traitement des images par rayons X. La première reconstruction 3D du visage d'une momie égyptienne à partir de coupes CT (tomодensitométrie 3D) par Myron Marx et Sue Haney D'Auria en 1988 a été saluée comme un tour de force technologique¹². Depuis, la qualité des images 3D de momies s'est considérablement améliorée¹³.
- 5 Les bio-anthropologues et les spécialistes de l'évolution humaine sont à présent unanimes à reconnaître que l'imagerie 3D a révolutionné leurs recherches. Dès 1985, Conroy et Vannier prédisaient que l'imagerie 3D deviendrait incontournable en paléanthropologie, du fait de sa capacité à visualiser et analyser les fossiles d'une manière totalement innovante¹⁴. Cette prédiction s'est réalisée, allant plus loin avec le développement d'une nouvelle approche appelée (paléo)anthropologie virtuelle¹⁵. De même, dans le domaine de l'archéologie, les reconstructions 3D sont saluées comme de nouvelles opportunités de recherche, de préservation du patrimoine et de promotion scientifique¹⁶.
- 6 Pour la paléopathologie, cependant, des réserves ont été émises sur l'utilité scientifique de la 3D, en dehors de ses qualités illustratives¹⁷. Cependant ces critiques concernent principalement les reconstructions par *volume rendering* et non celles réalisées par extraction de surface après segmentation.
- 7 L'objectif de cet article est d'illustrer les intérêts spécifiques de l'imagerie 3D pour la recherche en paléopathologie à partir de notre expérience pluridisciplinaire dans ce domaine.

Matériel et méthodes

Matériel : du Paléolithique moyen à la période moderne

- 8 Au sein de notre corpus de données paléopathologiques, nous avons retenu trois exemples pour illustrer les principales situations dans lesquelles l'approche 3D contribue de manière décisive au diagnostic paléopathologique. Ces exemples relèvent de la pathologie infectieuse ou traumatique et appartiennent à des périodes allant de la Préhistoire à la période moderne (tabl. 1).

Tabl. 1. – Exemples présentés en fonction de leur chronologie, topographie osseuse et nosographie.

Sites	Os concerné	Paléonologie
Qafzeh (Israël), individu n° 11, Paléolithique moyen	Crâne	Traumatique
Les Iboussières (Drôme), Paléolithique supérieur	Coxal / sacrum	Infectieux
Prieuré Saint-Laurent (Grenoble, Isère, XVIII ^e siècle)	Fémur	Infectieux

Méthodes : radiographie, coupes CT et reconstructions 3D

- 9 Nous avons procédé en deux étapes. Dans un premier temps, chaque cas a été réévalué en interprétant des images provenant de méthodes conventionnelles (radiographies simples et coupes CT-scan). Dans un deuxième temps, nous avons appliqué une approche 3D à chacun de ces cas. Les résultats obtenus par les deux approches conventionnelles ont ensuite été comparés à ceux obtenus par la 3D, afin d'évaluer les contributions respectives de l'imagerie 2D et 3D en paléopathologie.
- 10 Les coupes CT-scan ont été ouvertes au format DICOM sur le logiciel TIVMI®, dédié à la visualisation et à la reconstruction 3D¹⁸. La méthode que nous avons utilisée pour la reconstruction 3D est l'extraction de surface effectuée après un processus de segmentation manuelle par seuillage de niveaux de gris. Nous avons utilisé deux approches principales pour la segmentation : le remplissage des espaces vides et la séparation des structures de densité différente.
- 11 Les espaces vides correspondent à des cavités soit anatomiques, soit pathologiques, aériennes ou occupées par des tissus mous. Les cavités anatomiques (endocrâne, canal vertébral, sinus, cavité nasale, orbites, canal auditif...) peuvent être affectées par divers processus pathologiques (traumatiques, infectieux, tumoraux, congénitaux...) modifiant leur surface ou leur volume. Les cavités pathologiques (lacunes, kystes, géodes, empreintes, lyses) résultent de diverses pathologies intra- ou juxta-osseuses (infections, tumeurs, anévrismes...).
- 12 Quelle que soit l'origine anatomique ou pathologique de l'espace vide, le même protocole est appliqué en deux étapes successives :
- remplissage virtuel des espaces vides sur chaque coupe CT dans les trois orientations de l'espace (frontale, sagittale, axiale). Ce processus de segmentation, basé sur la différence de densité entre l'air et l'os, peut s'effectuer automatiquement, semi-automatiquement ou manuellement ;

- reconstruction 3D du moulage virtuel par différents algorithmes en fonction du logiciel utilisé, transformant l'empilement des coupes 2D en un volume 3D. Le démoulage du modèle virtuel permet d'effectuer une approche qualitative (forme générale et détails de surface) et quantitative (mesures linéaires et volumétriques).
- 13 Le modèle virtuel peut être extrait et étudié séparément ou maintenu en place, dans ce cas la possibilité d'appliquer un paramètre de transparence aux éléments segmentés permet une meilleure visualisation de leurs relations réciproques.
- 14 La séparation des structures de densité différente repose sur les variations de densité radiologique de l'os normal ou pathologique. La segmentation se fait ici entre densités osseuses différentes (au lieu de l'interface os / air) avec un protocole en quatre étapes :
- « peinture » virtuelle de chaque zone de densité osseuse équivalente sur chaque coupe CT dans les trois orientations de l'espace (frontale, sagittale, axiale). Ce processus peut être effectué automatiquement, semi-automatiquement ou manuellement en fonction de la netteté de la ligne de démarcation entre les zones de densités différentes ;
 - reconstruction 3D de régions segmentées, à l'aide d'algorithmes qui recréent des volumes à partir de l'empilement de coupes CT ;
 - différenciation virtuelle des zones pathologiques et normales. Comme dans le cas précédent, le protocole permet de réaliser des approches qualitatives et quantitatives. Une fois différenciées, les structures peuvent être séparées, distinguées par la transparence ou masquées pour mieux visualiser les structures sous-jacentes ;
 - repositionnement d'éléments segmentés si nécessaire (par exemple remise de pièces fracturées dans leur position anatomique), en utilisant des logiciels spécifiques (Geomagic, 3ds Max).
- 15 Cette procédure offre l'opportunité unique de restaurer l'état prépathologique et donc de modéliser l'évolution des processus pathologiques.

Résultats

Mise en évidence des processus pathologiques par reconstruction 3D des espaces vides

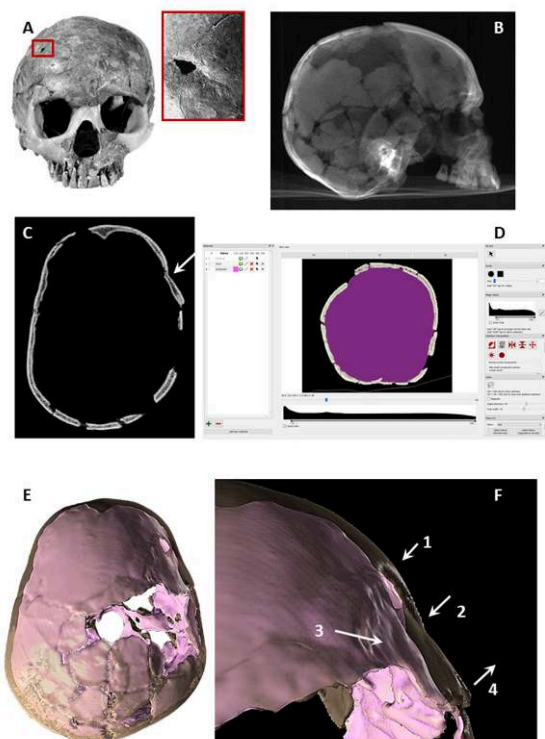
- 16 Le remplissage des espaces vides, qu'ils soient anatomiques ou pathologiques, apporte des informations complémentaires et originales par rapport aux approches bidimensionnelles. Nous illustrons ce résultat par deux exemples.

Mise en évidence d'un traumatisme crânioencéphalique au Paléolithique moyen

- 17 L'individu 11 du site de Qafzeh (Israël) est un adolescent d'environ 13 ans¹⁹ qui présente une lésion du côté droit de l'os frontal. Elle est caractérisée par une ligne déprimée qui se termine par une lacune de forme ovale (fig. 1A). Une image radiographique simple du crâne de ce jeune individu était disponible : outre la fragmentation taphonomique, la lésion peut être détectée sur le profil, mais ne fournit aucune information supplémentaire (fig. 1B). Cet aspect témoigne d'une fracture consolidée, en éliminant une autre cause de lésion lytique de la voûte crânienne. Sur certaines des coupes CT, on observe le déplacement d'un fragment frontal, mais il est impossible de dire si son origine est pathologique ou liée à la taphonomie (fig. 1C, flèche). La première étude clinique et radiologique a conclu à une fracture bénigne de la voûte crânienne, guérie

sans conséquence fonctionnelle²⁰. La reconstruction 3D de l'espace vide de l'endocrâne²¹ (fig. 1D et 1E) a révélé des informations peu (ou pas) visibles par les méthodes morphoscopiques et radiologiques conventionnelles concernant la surface cérébrale et la voûte crânienne située en regard. Il s'agit en fait d'un traumatisme crânien grave avec fracture pénétrante et plaie cérébrale : la partie antérieure de l'écaïlle frontale est enfoncée dans l'espace intracrânien, la surface sous-jacente du moulage endocrânien présente des irrégularités ; la suture coronale est désengrenée et soulevée vers l'extérieur, responsable d'un diastasis (fig. 1F).

Fig. 1. – Crâne de Qafzeh 11 (Paléolithique moyen, Israël).



A : aspect morphologique avec un agrandissement de la lésion crânienne (partie droite de l'os frontal). **B** : radiographie simple, vue latérale droite. **C** : coupe CT axiale au niveau de la lésion (flèche). **D** : logiciel TIVMI montrant le remplissage virtuel de la cavité endocrânienne en vue sagittale. **E** : reconstruction 3D en vue supérieure (la voûte crânienne apparaît en transparence et le moulage endocrânien virtuel en rose). **F** : vue rapprochée de la zone de traumatisme – 1 : ligne de fracture – 2 : partie antérieure de la fracture déprimée de l'os frontal pénétrant le volume endocrânien – 3 : forme irrégulière de la surface endocrânienne virtuelle indiquant des lésions cérébrales – 4 : diastasis de la suture coronale droite.

© Hélène Coqueugniot.

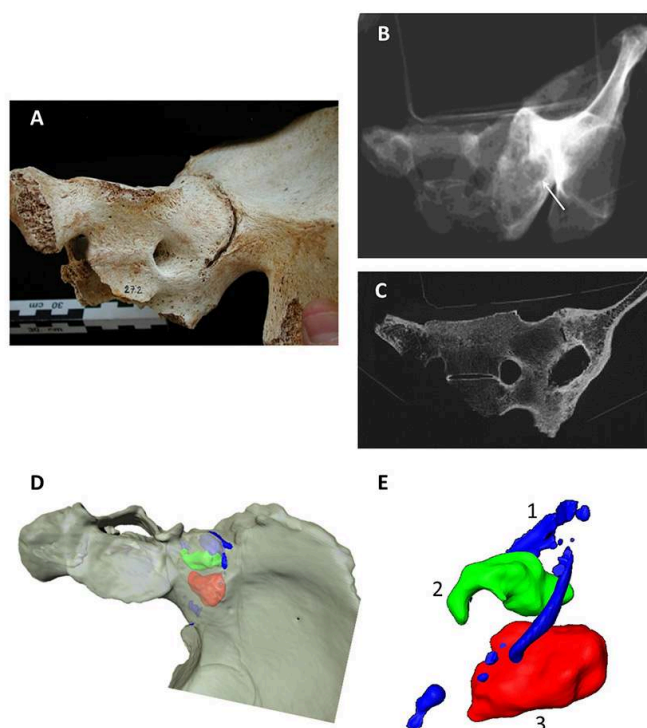
Reconstruction d'un processus infectieux au Paléolithique supérieur final

- 18 L'individu A de la grotte d'Iboussières, à Malataverne (Paléolithique supérieur, Drôme), est un adulte mature présentant une fusion partielle sacro-iliaque gauche²² (fig. 2A). La radiographie montre de plus une image radiotransparente arrondie située sur la zone articulaire, entourée d'une fine ligne de sclérose (fig. 2B). Les coupes scanner révèlent une cavité centrale en forme de kyste, avec des bords bien définis et sclérotiques, principalement développée du côté iliaque ; une cavité postérieure plus petite est de plus identifiée (fig. 2C). Cependant, les relations spatiales entre ces lésions et

l'articulation sacro-iliaque ne sont pas clairement visibles sur les coupes CT. L'hypothèse d'une sacroiliite infectieuse peut être proposée, mais le processus de propagation reste imprécis.

- 19 Les deux kystes et l'interligne non fusionné de l'articulation sacro-iliaque ont été segmentés coupe par coupe, puis virtuellement extraits de l'os. Cette reconstruction 3D permet de préciser les relations exactes entre ces trois structures (fig. 2D) : les deux kystes, bien définis et polylobulés, sont en miroir de part et d'autre de l'interligne et ne sont pas reliés entre eux. Le kyste antérieur, plus développé du côté iliaque, est le plus grand (4,5 cm³) et n'a pas de relation directe avec les restes de l'articulation sacro-iliaque ; le kyste postérieur, plus petit (1,9 cm³) et principalement étendu du côté sacrum, est en liaison directe avec l'articulation sacro-iliaque dans sa partie arrière. Cette communication vers l'extérieur peut correspondre au chemin de sortie de l'infection osseuse dans la région fessière (fig. 2E). Cet aspect évoque une infection tuberculeuse. Le scénario pourrait être le suivant : l'infection arrivée par voie hématogène sur l'un ou l'autre os de l'articulation sacro-iliaque s'est transformée en ostéomyélite focale puis en ostéoarthrite ; elle a contaminé l'os en regard ; le processus de guérison a ensuite fusionné partiellement l'articulation, divisant cette ostéomyélite granulomateuse en deux kystes séparés²³.

Fig. 2. – Fusion sacro-iliaque (Paléolithique supérieur, Iboussières, Drôme).



A : aspect morphologique. **B** : radiographie simple ; en raison de la superposition, la zone arrondie radioclaire est à peine visible (flèche). **C** : CT-scan, coupe frontale ; une cavité centrale kystique entourée d'une sclérose est clairement visible. **D** : reconstruction 3D de la fusion sacro-iliaque (vue supérieure) montrant en transparence 2 kystes (rouge et vert) recouvrant l'articulation sacro-iliaque (dont les reliquats sont identifiés en bleu foncé). **E** : démoulage virtuel de l'espace articulaire sacro-iliaque résiduel (1) et des 2 moulages de kystes (2 : postérieur et 3 : antérieur) ; contrairement au kyste antérieur (rouge), le kyste postérieur (vert) est en communication directe avec la partie postérieure de l'articulation sacro-iliaque ; il est interprété comme une voie d'évacuation de pus (abcès froid) dans les tissus mous de la région lombo-glutéale.

© Hélène Coqueugniot.

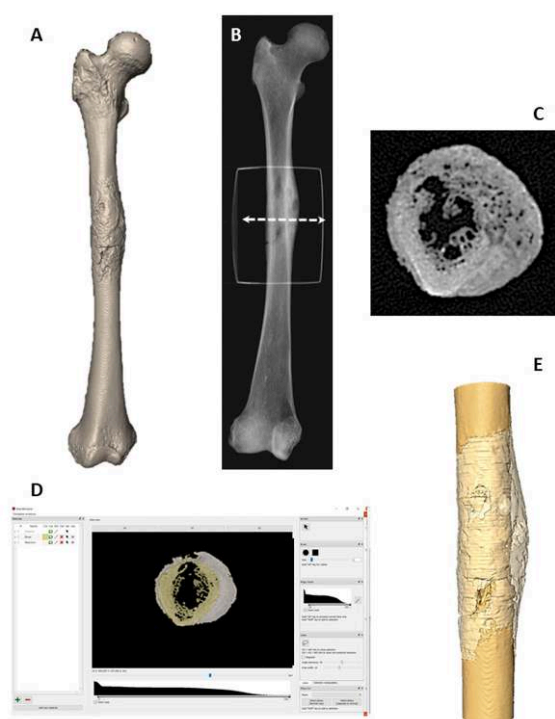
Mise en évidence des processus pathologiques par séparation des structures de densité différente

Reconstruction d'une ostéopériostite gommeuse fémorale (début de la période moderne)

- 20 Le prieuré Saint-Laurent de Grenoble compte plus de 1 500 tombes datant du IV^e au début du XVIII^e siècle²⁴. Le caveau S 929, utilisé du XV^e au XVII^e siècle, a livré plusieurs pièces pathologiques, certaines d'origine infectieuse. Un fémur droit présente un gonflement au milieu de la diaphyse, atypique pour une ostéomyélite banale (fig. 3A). Une radiographie simple a révélé que ce gonflement est principalement dû à un épaissement sous-périosté de l'os cortical (fig. 3B), les coupes CT ont confirmé le rôle prédominant de la réaction périostée dans la nouvelle formation osseuse ainsi que le remodelage modéré de la région endostéale (fig. 3C), aspect qui est en faveur d'une ostéopériostite et non d'une ostéomyélite.
- 21 Les tissus osseux, cortical et sous-périosté, ont été différenciés par segmentation manuelle sur chaque coupe CT, en fonction de leur densité osseuse. Cette étape ne peut

être automatisée car elle nécessite une expertise anatomique sur des coupes où la démarcation entre l'os normal et la réaction sous-périostée n'est pas très évidente. Ce procédé a permis d'obtenir des reconstructions 3D séparées (fig. 3D et 3E) et de fournir des informations sur l'aspect et le volume du tissu osseux pathologique, tout en visualisant l'état prépathologique de la diaphyse fémorale. La réaction sous-périostée développée principalement sur les parties antérieure et médiane de la diaphyse fémorale correspond à un gain de volume osseux de 7 %. Elle s'est organisée autour de lacunes irrégulières. L'aspect de la lésion est celui d'une ostéopériostite gommeuse, typique d'une tréponématose, dont fait partie la syphilis²⁵. La reconstruction 3D n'est pas ici décisive pour le diagnostic, mais permet d'approcher l'état prépathologique et de quantifier le développement de l'os néoformé²⁶.

Fig. 3. – Réaction périostée fémorale (prieuré Saint-Laurent, Grenoble, France, XV^e-XVII^e siècle).



A : aspect morphologique montrant un renflement à mi-diaphyse. **B** : radiographie simple révélant que l'épaississement de l'os cortical est lié à une ossification d'origine sous-périostée avec quelques lacunes. **C** : coupe CT axiale, confirmant le rôle prédominant de la réaction périostée. **D** : logiciel TIVMI montrant la segmentation de la néoformation osseuse à partir de la diaphyse fémorale à l'état prépathologique. **E** : reconstruction 3D montrant la réaction périostée en transparence. Le volume osseux néoformé est quantifié (7 % d'augmentation).

© Hélène Coqueugniot.

Contribution respective de l'imagerie 2D et 3D au diagnostic paléopathologique

- 22 Nous résumons dans le tableau 2 la contribution respective au diagnostic des trois méthodes d'imagerie (radiographie simple, coupes de tomodesitométrie, TDM 3D) appliquées aux trois exemples paléopathologiques retenus, en précisant la valeur ajoutée de la 3D.

Tabl. 2. – Comparatif des contributions diagnostiques respectives des trois méthodes d'imagerie et valeur ajoutée de la 3D.

	Qafzeh 11 (crâne)	Les Iboussières (os sacro-iliaque)	Prieuré Saint-Laurent (fémur)
Radiographie	Atteintes taphonomiques (fractures et parties manquantes); fracture bénigne cicatrisée de l'os frontal	Fusion sacro-iliaque; radioclarité arrondie adjacente à la zone fusionnée	Réaction périostée localisée à mi-diaphyse avec radioclarité ovale
Coupes scanner	Angulation d'un fragment juxta-coronal droit de l'os frontal; origine taphonomique possible	Grande cavité kystique recouvrant l'articulation sacro-iliaque	Néoformation osseuse antéromédiale de grande taille; remodelage modéré de l'espace endostéal suggérant une ostéopériostite gommeuse évoquant une infection tréponémique
Reconstruction 3D	Fracture de l'os frontal avec lésion cérébrale	Présence de 2 kystes en miroir de part et d'autre de l'articulation sacro-iliaque, évoquant une sacroilite tuberculeuse	Visualisation des gommages, quantification de la néoformation osseuse (7%); aspect typique d'une tréponématose (syphilis)
Valeur ajoutée de la 3D	Mise en évidence d'un traumatisme crânio-encéphalique	Preuve de 2 kystes en miroir au lieu d'un; preuves supplémentaires pour un diagnostic de tuberculose	Reconstruction de l'état prépathologique

Discussion

- 23 De nombreux articles utilisant l'imagerie 3D pour la paléopathologie ont été publiés au cours de ces trois dernières décennies. Face à cet engouement, de fortes réserves ont alors été émises sur l'utilité réelle de la 3D pour la recherche paléopathologique. Mais ces critiques concernent principalement les reconstructions automatiques dites par *volume rendering* et non celles réalisées par extraction de surface après segmentation. Dans la première méthode, la reconstruction est indépendante de l'opérateur, qui n'a aucun contrôle du rendu 3D, alors que dans la seconde, la segmentation est effectuée coupe par coupe sous le contrôle de l'opérateur, qui sélectionne les zones à reconstruire en 3D. Cet effet « opérateur-dépendant » est réduit dans notre protocole par la nature collégiale des décisions de segmentation impliquant plusieurs experts (en traitement d'image, anatomie, ostéologie, anthropologie, imagerie médicale, médecine clinique et paléopathologie) et garantissant un niveau élevé de fiabilité des reconstructions.

- 24 Cette méthode offre l'opportunité unique de reconstruire les processus paléopathologiques, notamment ceux d'origine traumatique ou infectieuse, en restaurant virtuellement l'état initial puis en modélisant l'évolution du processus jusqu'à son état final (moment du décès), sorte de « suivi » numérique virtualisant un processus paléopathologique donné²⁷.
- 25 En résumé, nous considérons que les reconstructions 3D obtenues par la méthode d'extraction de surface ont toute leur place au sein des méthodes appliquées à la recherche paléopathologique.

BIBLIOGRAPHIE

Aymard I., Ardagna Y., Lalys L., Signoli M., Gély B., Dutour O., 2007, « Étude anthropologique du site azilien des Iboussières (Malataverne, Drôme) », dans Évin J. (dir.), *Congrès du centenaire : un siècle de construction du discours scientifique en préhistoire*, actes du Congrès préhistorique de France (26, Avignon, 2004), vol. 2, p. 537-544.

Baudouin M., 1923, « La radiographie appliquée à l'étude des lésions osseuses humaines préhistoriques », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 176, p. 782-785.

Chhem R. K., 2006, « Paleoradiology: Imaging Disease in Mummies and Ancient Skeletons », *Skeletal Radiology*, vol. 35, p. 803-804.

Chhem R. K. et Brothwell D. R., 2008, *Imaging Mummies and Fossils*, Berlin / Heidelberg, Springer.

Colardelle R., 1996, « Saint-Laurent et les cimetières de Grenoble du IV^e au XVIII^e siècle », dans Galinié H. et Zadora-Rio E. (dir.), *Archéologie du cimetière chrétien : actes du 2^e colloque ARCHEA*, Orléans, Revue archéologique du centre de la France (suppl. 11), p. 111-124.

Conroy G. C. et Vannier M. W., 1985, « Endocranial Volume Determination of Matrix-Filled Fossil Skulls using High-Resolution Computed Tomography », dans Tobias P. V. (dir.), *Hominid Evolution: Past, Present and Future*, New York, Liss, p. 419-426.

Coqueugniot H. et Dutour O., 2015, « Apports de l'imagerie numérique 3D à l'étude de l'os ancien, normal et pathologique », dans Brugal J.-P., Balasse M., Reiche I., Geigl E. M., Oberlin C. (dir.), *Messages d'os : archéométrie du squelette animal et humain*, Éditions archives contemporaines, p. 255-267.

Coqueugniot H., Dutour O., Arensburg B., Duday H., Vandermeersch B., Tillier A.-M. 2014, « 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*, vol. 9, n° 7, e102822.

Coqueugniot H., Dutailly B., Desbarats P., Boulestin B., Pap I., Szikossy I., Baker O., Montaudon M., Panuel M., Karlinger K., Kovács B., Kristóf L. A., Pálfi G., Dutour O., 2015a, « Three-Dimensional Imaging of Past Skeletal TB: from Lesion to Process », *Tuberculosis*, vol. 95, p. S73-S79.

Coqueugniot H., Dutailly B., Desbarats P., Buzhilova A. P., Dutour O., 2015b, « Développement des virtothèques ostéologiques en anthropologie biologique et en paléopathologie », dans

- Vergnieux R. et Delevoie C. (dir.), *Actes du colloque Virtual Retrospect 2013*, Bordeaux, Ausonius éditions (Archéovision, 6), p. 57-62.
- Dastugue J., 1981, « Pièces pathologiques de la nécropole moustérienne de Qafzeh », *Paléorient*, vol. 7, p. 135-140.
- Dedekind A., 1896, « A Novel Use for the Roentgen Rays », *British Journal of Photography*, vol. 43, p. 131.
- Dutailly B., Coqueugniot H., Desbarats P., Gueorguieva S., Synave R., 2009, « 3D Surface Reconstruction Using HMH Algorithm », *2009 16th IEEE International Conference on Image Processing*, actes de congrès (16, Le Caire, 2009), IEEE, p. 2505-2508.
- Dutour O., Palfi G., Panuel M., Gely B., 1995, « Paleopathological Study of Upper Palaeolithic Remains from Southeastern France », *Journal of Paleopathology*, vol. 7, p. 98.
- Dutour O., Coqueugniot H., Naji S., Colombo A., Herrscher E., Dutailly B., 2012, « Contribution of 3D Imaging to Identify Paleopathological Processes », *Paleopathology Newsletter*, abstracts volume, p. S12.
- Gostner P., Pernter P., Bonatti G., Graefen A., Zink A. R., 2011, « New Radiological Insights into the Life and Death of the Tyrolean Iceman », *Journal of Archaeological Science*, vol. 38, p. 3425-3431.
- Hackett C. J., 1976, *Diagnostic Criteria of Syphilis, Yaws, and Treponarid (Treponematoses) and Some Other Diseases in Dry Bones (for the Use in Osteo-Archaeology)*, Berlin, Springer.
- Jansen R. J., Poulus M., Taconis W., Stoker J., 2002, « High-Resolution Spiral Computed Tomography with Multiplanar Reformatting, 3D Surface- and Volume Rendering: a Non-Destructive Method to Visualize Ancient Egyptian Mummification Techniques », *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 26, p. 211-216.
- Katz J. et Tokovinine A., 2017, « The Past Now Showing in 3D: Case Studies in 3D Archaeology », *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 6, p. 1-3.
- König W., 1896, *14 Photographien mit Röntgen-Strahlen, aufgenommen im Physikalischen Verein, zu Frankfurt A.M.*, Leipzig, Verlag von Johann Ambrosius Barth.
- Lewin P. K. et Harwood-Nash D. C. F., 1977, « Computerized Axial Tomography in Medical Archeology », *Paleopathology Newsletter*, vol. 17, p. 8-9.
- Lynnerup N., 2008, « Computed Tomography Scanning and Three-Dimensional Visualisation of Mummies and Bog Bodies », dans Pinhasi R. et Mays S. (dir.), *Advances in Human Palaeopathology*, Wiley, p. 101-119.
- Marx M. et D'Auria S. H., 1988, « Three-Dimensional CT Reconstruction of an Ancient Human Egyptian Mummy », *American Journal of Roentgenology*, vol. 150, p. 147-149.
- Moodie R. L. 1931, *Roentgenologic Studies of Egyptian and Peruvian Mummies*, Chicago, University of Chicago Press.
- Pales L., 1929, « État actuel de la paléopathologie, contribution à l'étude de la pathologie comparative », thèse de doctorat en médecine, université de Bordeaux.
- Pickering R. B., Conces D. J. Jr., Braunstein E. M., Yurco F., 1990, « Three-Dimensional Computed Tomography of the Mummy Wenuhotep », *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 83, p. 49-55.
- Röntgen W. C., 1896, « On a New Kind of Rays », *Nature*, vol. 53, p. 274-276.

- Ruffer M. A., 1913, « Studies in Palaeopathology in Egypt », *The Journal of Pathology*, vol. 18, p. 149-162.
- Ruffer M. A., 1921, « Pathological Notes on the Royal Mummies of the Cairo Museum » dans Moodie R. L. (dir.), *Studies in the Paleopathology of Egypt*, Chicago, University of Chicago Press, p. 166-178.
- Shufeldt R. W., 1893 « Notes on Paleopathology », *Popular Science Monthly*, vol. 42, p. 679-684.
- Tillier A.-M., 1999, *Les enfants moustériens de Qafzeh : interprétation phylogénétique et paléoauxologique*, Paris, CNRS éditions (Cahiers de paléanthropologie).
- Vergnieux R. et Giligny F., 2016, « Pour un usage raisonné de la 3D en archéologie », *Les Nouvelles de l'archéologie*, vol. 146.
- Weber G., 2001, « Virtual Anthropology (VA): a Call for Glasnost in Paleoanthropology », *Anatomical Record (New Anatomist)*, vol. 265, p. 193-201.
- Wong P. A., 1981, « Computed Tomography in Paleopathology: Technique and Case Study », *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 55, p. 101-110.

NOTES

1. Shufeldt 1893.
2. Röntgen 1896.
3. Dedekind 1896.
4. König 1896.
5. Ruffer 1913.
6. Ruffer 1921.
7. Baudouin 1923.
8. Pales 1929.
9. Moodie 1931.
10. Lewin et Harwood-Nash 1977.
11. Wong 1981 ; Pickering *et al.* 1990.
12. Marx et D'Auria 1988.
13. Jansen *et al.* 2002 ; Lynnerup 2008 ; Gostner *et al.* 2011.
14. Conroy et Vannier 1985.
15. Weber 2001.
16. Vergnieux et Giligny 2016 ; Katz et Tokovinine 2017.
17. Chhem 2006 ; Chhem et Brothwell 2008, p. 53.
18. Dutailly *et al.* 2009.
19. Tillier 1999.
20. Dastugue 1981.
21. Coqueugniot *et al.* 2014.
22. Dutour *et al.* 1995 ; Aymard *et al.* 2007.
23. Coqueugniot *et al.* 2015a.

24. Colardelle 1996.
 25. Hackett 1976.
 26. Dutour *et al.* 2012 ; Coqueugniot et Dutour 2015.
 27. Coqueugniot *et al.* 2015b.
-

RÉSUMÉS

Nous illustrons l'apport de la paléoimagerie 3D au diagnostic rétrospectif en paléopathologie. Pour cela, nous avons sélectionné trois exemples paléopathologiques représentant deux catégories nosographiques (traumatisme et infection) de périodes allant du Paléolithique moyen au début de l'époque moderne. Nous avons comparé pour chacun la valeur diagnostique des radiographies simples, des coupes tomодensitométriques et des reconstructions 3D. Ces dernières ont été réalisées par tomодensitométrie par ordinateur (CT) et obtenues par extraction de surface après un processus de segmentation, en utilisant le logiciel TIVMI. Notre approche par tomодensitométrie 3D a permis de reconstruire des processus pathologiques sur des vestiges anciens par deux méthodes, la reconstruction d'espaces vides et la séparation des structures par densité. La paléoimagerie 3D apporte, en complément des analyses classiques, une indéniable valeur ajoutée à la connaissance des états de santé des populations du passé.

We highlight the contribution of 3D paleoimaging to retrospective diagnosis in palaeopathology. For this purpose, we selected three palaeopathological examples representing two nosographic categories (trauma and infection) from Middle Palaeolithic to the beginning of the modern era. For each case, we compared the diagnostic value of plain radiographs, CT-scans and 3D reconstructions. The latter were performed using scanner acquisitions and obtained by surface extraction after a segmentation process, using the TIVMI software. Our 3D approach allowed us to reconstruct pathological processes by two methods, the reconstruction of empty spaces and the separation of structures by their densities. 3D paleoimaging complements the analyses performed by conventional methods and brings a significant added value to the knowledge of health status among past populations.

INDEX

Mots-clés : reconstruction 3D, paléopathologie, extraction de surface, paléoimagerie, processus pathologique

Keywords : 3D reconstruction, paleopathology, surface extraction, paleoimaging, pathological process

AUTEURS

HÉLÈNE COQUEUGNIOT

Laboratoire De la Préhistoire à l'actuel : culture, environnement et anthropologie (PACEA, UMR 5199, université de Bordeaux / CNRS) ; École pratique des hautes études (université Paris sciences et lettres)

OLIVIER DUTOUR

Laboratoire De la Préhistoire à l'actuel : culture, environnement et anthropologie (PACEA, UMR 5199, université de Bordeaux / CNRS) ; École pratique des hautes études (université Paris sciences et lettres)