

La découverte extraordinaire de l'enfant de Sedeinga (Nubie soudanaise)

The extraordinary discovery of Sedeinga child (sudanese Nubia)

Dr M. Flaczynski*, Dr. F. Janot**

* ** Faculté de chirurgie dentaire de Nancy

** membre associé de l'Académie de chirurgie dentaire, membre de la commission archéologique de Sedeinga
 (marc.flac@hotmail.fr) (Francis.Janot@odonto.uhp-nancy.fr)

Mots clés

- ◆ stéréolithographie
- ◆ anthropologie
- ◆ craniosténose
- ◆ Nubie
- ◆ Sedeinga

Résumé

L'objet de ma présentation concerne la reconstruction tridimensionnelle d'un crâne sec à partir de coupes tomodensitométriques. Le crâne à l'origine de ce travail est celui d'un jeune enfant âgé de trois à quatre ans à sa mort et daté d'environ -700 ans av. J.-C. Il a été trouvé au cours de fouilles archéologiques au Soudan sur le site de Sedeinga et présente comme particularité une malformation crânienne qui, du point de vue paléopathologique, est la plus ancienne craniosténose jamais trouvée à ce jour. L'étude anthropologique et radiologique montre certaines particularités anatomiques endocraniques qui ont été mises en évidence dans un premier temps par conception assistée par ordinateur puis par la fabrication d'un modèle solide via le procédé de stéréolithographie laser. La méthodologie et le résultat final obtenu dans la réalisation de cette pièce par prototypage rapide seront donc exposés ainsi que l'intérêt d'un tel procédé appliqué à l'anthropologie.

Keywords

- ◆ stereolithography
- ◆ anthropology
- ◆ craniostenosis
- ◆ Nubia
- ◆ Sedeinga

Abstract

My presentation focuses on the three-dimensional rebuilding of a dry skull from tomodensitometric sections. The skull involved belongs to a child aged 3 or 4. His death dates back to around 700 years BC. It was found during archaeological excavations on Sedeinga site, Sudan. Its cranial malformation is its most striking feature. Indeed, from a paleopathological point of view, this is the oldest craniostenosis ever found. The anthropological and radiological studies show some endocranial particularities within its anatomy, which were first highlighted by computer engineering, and then through to a solid model designed by laser stereolithography. The methodology and the final result achieved during the crafting of this piece by rapid prototyping will be detailed along with the interest of such a process applied to anthropology.

L'observation des fossiles et plus particulièrement des crânes est sans doute à l'heure actuelle le meilleur moyen pour l'homme de connaître les mécanismes ayant conduit à son évolution, tels sont les propos de Farid Taha. Jusqu'à l'apparition de nouvelles technologies de modélisation informatique et de prototypage rapide, l'étude des pièces anatomiques était freinée par plusieurs obstacles majeurs avec lesquels les chercheurs devaient composer. L'arrivée, il y a 20 ans, de la stéréolithographie qui a vu se développer plusieurs autres techniques avec plus ou moins de succès en fonction de leurs avantages et de leurs inconvénients a été une révolution. Développant son principe et ses possibilités notamment dans le domaine anthropologique, nous verrons ensuite un exemple de réalisation.

Les différentes méthodes de confection de modèles solides tridimensionnels

Depuis la fin du XIX^e siècle, plusieurs méthodes de modélisation des éléments biologiques ou anatomiques se sont développées avec plus ou moins de succès selon l'étendue de leur champ d'application et selon leur facilité ou difficulté de mise en place. Parmi celles-ci, on peut citer la méthode de Born (1876) qui consiste à agrandir une structure de taille mésoscopique ou microscopique. La structure étudiée est tout d'abord décomposée en une série de coupes successives et jointives qui sont ensuite agrandies et fixées sur un support. C'est l'empilement de ces supports qui reproduit la morphologie et le volume agrandi de la structure initiale. Le procédé de Frohberg et Haase, fixé dans les années 80, a

Correspondance :

marc.flac@hotmail.fr

Francis.Janot@odonto.uhp-nancy.fr

pour but d'améliorer le diagnostic et l'acte chirurgical en chirurgie orthognathique. Après un examen tomodensitométrique, les données sont transmises vers un dispositif à fraiser qui permet la fabrication de modèles polyuréthane 3D de même dimension que le crâne du patient. Pour une vision détaillée du contour des arcades dento-alvéolaires nécessaire et indispensable à la simulation du résultat obtenu, des modèles dentaires, obtenus par empreintes buccales sont transférés sur le modèle polyuréthane grâce à de multiples points de référence.

Les maquettes Scalam® ont été développées en 1988 par Renouard pour l'implantologie dentaire. La structure osseuse étudiée est obtenue par empilement de plaques de plastique qui correspondent à chacune des coupes du bilan tomodensitométrique. Sur une maquette en plastique transparent, il est possible de deviner la présence d'éléments internes. La nécessité de disposer d'un modèle le plus fidèle possible, correctement lissée, avec la présence effective d'éléments internes individualisés, impossible à obtenir par les technologies de fraisage citées précédemment, nous a conduits à expérimenter une conception de modèles à partir d'une technologie de pointe en matière de fabrication assistée par ordinateur : la stéréolithographie.

La stéréolithographie : principe et intérêt en anthropologie

La stéréolithographie fait partie des procédés de prototypage rapide les plus évolués. Le terme de prototypage rapide s'applique à n'importe quelles méthodes de fabrication rapide de prototypes, telles que celles que nous avons vues précédemment, mais il est plus souvent réservé aux techniques de fabrication couche par couche, c'est à dire celles qui consistent à rajouter de la matière, par opposition aux procédés qui consistaient à déformer ou enlever de la matière. André (1) définit également cette technique comme un procédé d'impression en trois dimensions, équivalent à une "photocopieuse 3D" ou à un dispositif de copie d'écran 3D.

Nous avons donc la chaîne de conception/fabrication suivante : tout d'abord, l'acquisition des données anatomiques par tomodensitométrie puis l'étape de conception assistée par ordinateur (CAO) qui correspond au traitement informatique des données et à la modélisation informatique tridimensionnelle (le logiciel utilisé est MIMICS® de la société Matéria-



Fig. 1. crâne sec II T47 et vue radiographique de profil

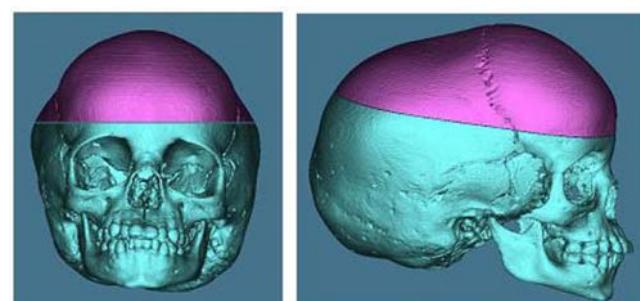


Fig. 2. modélisation informatique tridimensionnelle du crâne II T47

lise) et enfin l'étape de fabrication assistée par ordinateur (FAO). Les données de la modélisation informatique sont transférées dans un format propre à la stéréolithographie et à partir de ces informations un ordinateur va piloter l'ensemble des constituants optiques, mécaniques et opto-mécanique de la machine de stéréolithographie.

Le principe de fabrication est le suivant : l'objet à réaliser est construit par tranches successives à partir de celle du bas. Le plateau va ensuite s'enfoncer par pas successifs après polymérisation de chacune des couches. Le faisceau laser est défléchi sur la surface horizontale du monomère à l'aide de deux miroirs galvanométriques commandés par l'interface de contrôle. Il peut ainsi durcir avec précision l'ensemble de la tranche en cours selon un algorithme de balayage étudié pour minimiser les distorsions liées au retrait de la résine pendant la polymérisation. Lorsque le balayage laser a été effectué sur la première tranche, le plateau support s'enfonce verticalement, recouvrant ainsi la zone durcie d'une épaisseur de monomère liquide, dont la valeur dépend de la précision verticale qui est souhaitée. Ensuite le racleur vient effleurer la surface de la résine pour éliminer les effets de bombage dus à la viscosité du monomère. Alors peut recommencer le balayage laser pour la tranche suivante. Après la réalisation de la dernière couche de la pièce, le plateau soutient la maquette au fond du bac, et la pièce est totalement submergée. Le moteur actionnant la commande de l'axe vertical permet de dégager totalement la pièce du milieu liquide. La pièce est rigide mais pas encore totalement durcie. C'est donc avec précaution que le modèle est détaché de son support et que la pièce est amenée sur le lieu de finition où elle est rincée, post-polymérisée et polie.

Outre des applications odontologiques, médico-chirurgicales pour le diagnostic et la répétition du geste chirurgical et médico-légales, cette technique a des applications anthropologiques : La modélisation informatique et la stéréolithographie. Elles permettent en effet un accès aux structures anatomiques internes et un accès aux contours osseux externes, dans le cas de corps momifiés par exemple : à partir d'un corps ou d'une tête recouverts de tissus mous momifiés on cherche à reconstituer les éléments osseux sous-jacents pour voir les éventuelles particularités anatomiques. De fait, il est également possible de réaliser des manipulations et mesures indirectes sur le modèle virtuel informatique et directes sur le modèle issu de la stéréolithographie.

Comme en médecine légale, il est maintenant possible de reconstruire la physionomie faciale à partir d'un crâne ou d'un fossile crânien. Il en existe deux grandes possibilités : l'informatique, avec des logiciels qui vont simuler les volumes des tissus mous et appliquer une texture proche de celle de la peau reconstituant ainsi un visage, ou la stéréolithographie qui va, à partir d'une modélisation informatique, donner un modèle crânien fidèle qui va être la base d'un travail de reconstruction faciale classique. La technique informatique permet aussi une séparation du crâne fossilisé de sa matrice



Fig. 3. modèle stéréolithographique du crâne II T47

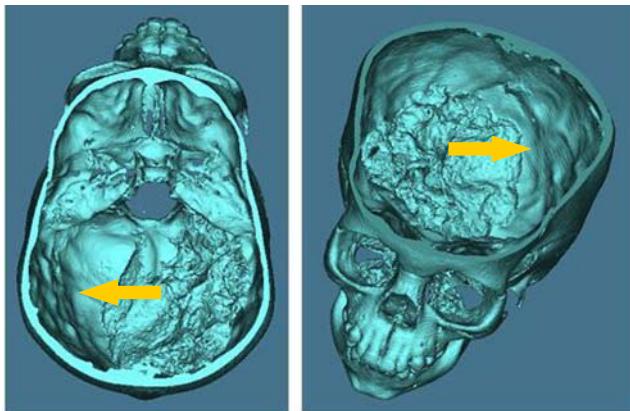


Fig. 4. vue endocrânienne du modèle virtuel issu de l'informatique

minérale. Une fois ce nettoyage virtuel effectué, l'étude du modèle virtuel ou solide reconstruit par stéréolithographie est possible. D'autres possibilités informatiques permettent un traitement "pré-stéréolithographique" du crâne pour l'étude ultérieure du modèle en résine : fabrication de pièces par effet miroir, fusion de deux pièces ou compensation des déformations plastiques ou remontage de fragments originaux. Enfin cette technique permet la reproduction de pièces fragiles ou pour étude dans plusieurs laboratoires.

Application de la stéréolithographie sur le crâne sec II T47

Le crâne sec de II T47 (Fig. 1) a été trouvé, en même temps que le reste du corps, au cours de l'hiver 1993-1994 par Francis Janot (3) sur un chantier archéologique qui se trouve à Sedeinga, en Nubie soudanaise. La vaste nécropole se subdivise en trois secteurs principaux et la tombe porte le numéro 47 d'où sa dénomination, "secteur II tombe 47", soit II T47. C'est le crâne d'un jeune enfant âgé d'environ 3 ans, au vu de l'étude anthropologique et dentaire. Il présente comme particularité une craniosténose de type scaphocéphalie, correspondant à la fermeture prématuée de la suture crânienne sagittale.

L'étude du matériel funéraire associé au corps montre que ce dernier peut être daté de 700 av J.C. ce qui correspond à la période napatéenne durant laquelle Nubie et Egypte ne formaient qu'une seule et même entité dirigée par les pharaons noirs, dit "éthiopiens", de la XXV^e dynastie.

La pièce anatomique est fragile mais particulièrement bien conservée, ceci étant dû aux conditions de sécheresse qui règnent dans la région soudanaise. Elle présente cependant quelques petites fractures osseuses qui sont postérieures au décès et donc dues vraisemblablement aux manipulations et autres transports.

Ce crâne a transité par Paris, où des clichés radiographiques ont été réalisés par J. et P. Bourrier (radiologues à l'hôpital Saint Louis) sur la demande du Professeur Cussenot (laboratoire d'anatomie humaine de la Faculté de Médecine des Saints-Pères), avant d'arriver à Nancy pour une étude radiologique, anatomique et anthropologique.

L'examen tomodensitométrique a été réalisé par le Docteur Jacquet (centre d'imagerie Jacques Callot de Maxéville) selon une procédure standardisée pour une acquisition osseuse et sur un scanner permettant une acquisition hélicoïdale. Le crâne a été positionné sur la table du scanner de façon à respecter au mieux la position anatomique et a été maintenu en place par une tête. Les données du scanner ont été enregistrées selon la norme DICOM ainsi que sous forme d'images au format JPEG.

La modélisation informatique tridimensionnelle a été développée au LIAD qui se trouve à l'ENSG-INPL de Nancy (Ecole Na-

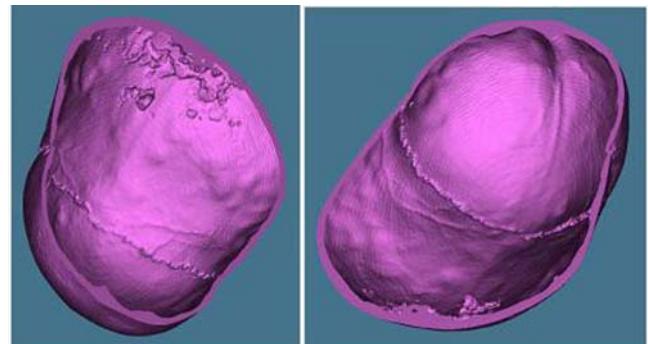


Fig. 5. la calotte crânienne : absence de suture sagittale et empreintes des vaisseaux cérébraux

tionale Supérieure de Géologie) avec l'aide de Pierre Jacquemin. La segmentation en trois parties : tête, calotte crânienne et partie inférieure du crâne a été réalisée à partir des 299 coupes scanner aboutissant à la reconstruction virtuelle en trois dimensions du crâne, la tête n'étant pas conservée lors de la modélisation (Fig. 2). Pour vérifier la concordance de la modélisation virtuelle avec le crâne sec, des mesures anthropologiques comparatives ont été réalisées qui correspondent les unes aux autres.

Ensuite, la fabrication par stéréolithographie a été réalisée à l'ENSG-INPL de Nancy (Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques - Institut National Polytechnique de Lorraine) au DCPR (Département de Chimie Physique des Réactions) avec le concours de Serge Corbel.

Une fois le crâne fabriqué, il est délicatement sorti de son bain de monomère et passe par une étape de finition avant d'être étudié (Fig 3).

Comme vu précédemment, l'intérêt d'un tel procédé pour ce crâne est la possibilité d'accéder à des structures anatomiques profondes, invisibles de l'extérieur, pour en faire une observation et éventuellement des mesures dans le but d'une interprétation qualitative et quantitative de la dysmorphose. En ce qui concerne la scaphocéphalie, plusieurs causes ont été avancées. Une des hypothèses est que, comme pour les autres craniosténoses, la scaphocéphalie est due à une anomalie primaire de la base du crâne qui induit une fermeture prématuée de la suture sagittale. Une autre hypothèse, plus classique, veut que l'origine de la craniosténose soit une atteinte primaire des sutures de la voûte crânienne, même si aucun élément probant n'a été apporté dans ce sens. Dans les deux cas, la base du crâne, qui est à l'origine de la craniosténose ou qui la subit, devrait montrer des variations morphologiques anormales. En outre, des variations de certaines structures anatomiques crâniennes associées à la scaphocéphalie ont été clairement identifiées et décrites : parmi celles-ci nous pouvons citer les empreintes digitiformes ou cérébriformes qui signent une hypertension intra-crânienne ou encore une modification dans la morphologie du canal optique. Le but de la modélisation tridimensionnelle informatique et stéréolithographique est donc de permettre une vision directe de la base du crâne ou de la partie endocrânienne de la voûte pour mettre en évidence ces éventuelles modifications. Enfin, l'observation des différentes sutures de la base du crâne permet, dans notre cas, de confirmer l'âge au décès. Les observations faites sur le modèle issu du traitement informatique sont les suivantes :

La reconstruction en trois dimensions, virtuelle puis réelle par stéréolithographie, en deux parties de la pièce anatomique permet un accès à la base du crâne ainsi qu'à sa partie occipitale. On peut objectiver ici en particulier un dépôt à l'intérieur du crâne ainsi que des empreintes digitiformes qui signent une probable hypertension intra-crânienne, conséquence d'une croissance cérébrale importante dans un milieu non expansible du fait de la fermeture prématuée de la suture sagittale et d'une partie de la suture lambdoïde (Fig. 4).

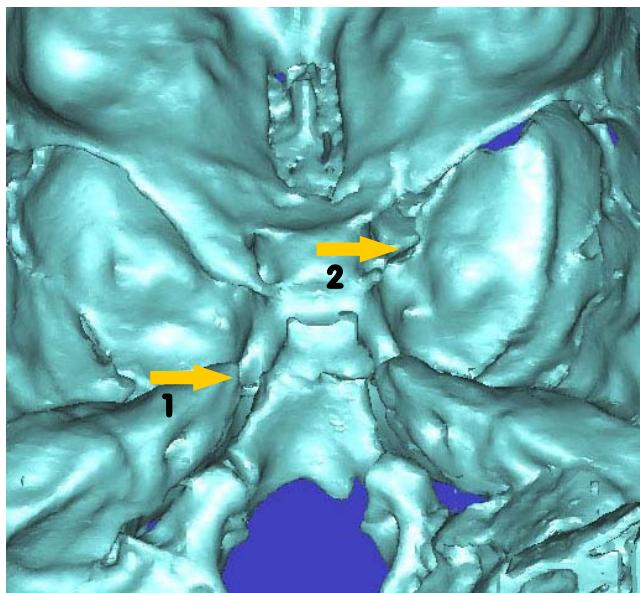


Fig. 6. observations de la région sphénoïdale

La visualisation de la calotte crânienne permet quant-à elle de mettre en évidence, entre autres, l'absence de suture sagittale, signe de la scaphocéphalie, les empreintes digitiformes, moins visibles que sur la partie inférieure du crâne ainsi que l'empreinte marquée des vaisseaux cérébraux (Fig. 5). En ce qui concerne la confirmation de l'âge au décès, l'observation des sutures a permis de confirmer l'étude anthropologique.

Sur une vue endocrânienne postérieure, un agrandissement de la région sphénoïdale montre clairement une fracture au niveau de la grande aile et de la petite aile droite du sphénoïde (1).

Elle pourrait être dû à un traumatisme post-mortem car la région orbitaire présente également des traces de fracture, mais n'a aucun lien avec la craniosténose (2) (Fig. 6).

Sur la même vue endocrânienne postérieure, la suture exoccipitale-supraoccipitale (2) dont la date de fermeture se situe entre 2 et 3 ans est fusionnée alors que la suture basioccipitale (1) dont la date de fermeture est entre 3 et 4 ans est encore présente.

Cette observation va dans le sens de l'étude anthropologique qui donne un âge dentaire d'environ 3 ans (Fig. 7).

Les observations faites sur ce crâne sont très prometteuses bien qu'aucune variation morphologique majeure de la base du crâne n'ai pu être mise en évidence, ceci étant lié en partie au jeune âge de l'enfant et à sa croissance peu avancée ainsi qu'au type même de craniosténose, une scaphocéphalie, dont les manifestations sont généralement peu importantes.

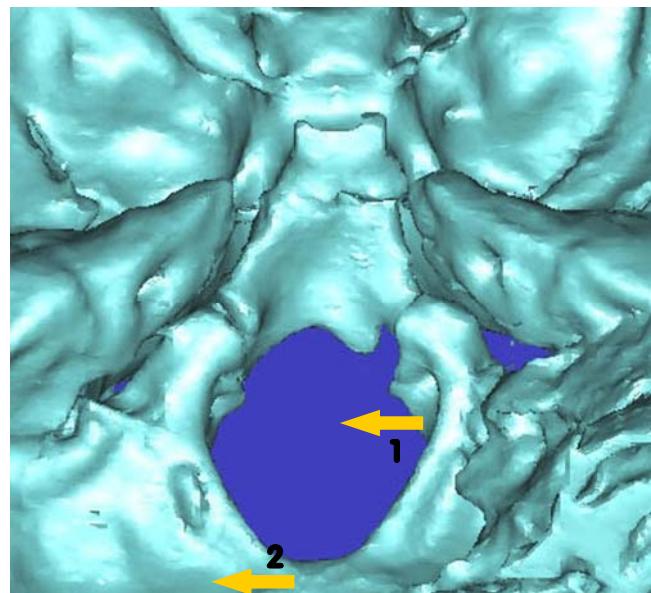


Fig. 7. observations de l'os occipital : précisions sur l'âge au décès

Conclusion

Comme nous avons pu le constater tout au long de cet exposé, la modélisation informatique et stéréolithographique est actuellement un des meilleurs procédés pour la reconstitution tridimensionnelle d'un crâne sec à partir de coupes tomodensitométriques. Nous avons entrevu, par le biais des applications anthropologiques, l'importance de cette technique dans l'étude des structures anatomiques. Il reste néanmoins beaucoup de travail pour rendre cette méthode accessible au plus grand nombre et pour l'améliorer sur le plan technique, mais les bases sont posées de ce qui est en passe de devenir un instrument aussi essentiel que le sont devenues photographies et radiographies en d'autres temps.

Références

1. ANDRE J. C., CORBEL S. *Stéréophotolithographie laser*, Paris, Ed. Polytechnica, 1994.
2. GIMENEZ F. Prototypage rapide d'intérêt médical : application aux reconstructions osseuses. *Thèse de l'Institut national polytechnique de Lorraine*, Nancy I, 1999, 190 p.
3. JANOT F., CARTIER F. Un enfant de l'époque naphtéenne à Se-deinga, *B.I.F.A.O.*, n° 98, 1998, p. 215-222
4. MOLE C. Intérêts de procédés de nouvelles technologies en chirurgie expérimentale : implémentation de données médicales en modélisation surfacique 3D et en reconstruction plastique par stéréophotolithographie laser. *Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré*, Nancy I, 1996, 291 p.
5. STRICKER M., VAN DER MEULEN J., RAPHAEL B., MAZZOLA R. *Craniofacial Malformations*, Edinburgh, London, Melbourne and New York, Churchill Livingston, 1990.

Crédits iconographiques : Dr Marc Flaczynski et Dr Francis Janot