

Les collections muséographiques en 3D par microtomographie rayons X

Julien NOEL ¹, Gérard SUBSOL ², Bertrand MAFART³, Gaspard GUIPERT ³, Jean-Dominique GASCUEL ³

<p>(1) DIGISENS S.A. 12 allée du Lac de Garde Savoie Technolac – BP278 73375 Le Bourget du Lac Cedex E-mail : julien.noel@digisens.fr</p>	<p>(2) Projet FOVEA http://foveaproject.free.fr E-Mail : Gérard.Subsol@wanadoo.fr</p>
<p>(3) Antenne de l'Institut de Paléontologie Humaine Europôle Méditerranéenne de l'Arbois Bat Villemin BP80 13545 Aix en Provence Email : bertrand.mafart@univ.u-3mrs.fr</p>	
<p>(4) Artis – Laboratoire GRAVIR/IMAG - CNRS 655, av. de l' Europe, Montbonnot 38334 St Ismier cedex E-Mail : Jean-Dominique.Gascuel@imag.fr</p>	

Abstract: La microtomographie par rayons X est un outil extrêmement performant pour la numérisation et la modélisation d'objets en 3D. Technologie non destructive, son plus grand atout est de permettre la visualisation de la structure interne des objets, avec une très grande précision. Dans le domaine de la muséographie, la microtomographie ouvre de nouvelles perspectives. Plus particulièrement utilisée en archéologie et en paléontologie, elle permet d'analyser en trois dimensions les structures internes – constitution, objets cachés, défauts – et de modéliser les surfaces sans zone d'occultation.

La tomographie 3D est un outil polyvalent et multi-applications : de la recherche scientifique et l'aide à la restauration et la conservation à la présentation interactive (exposition, vulgarisation, pédagogie) en passant par la sauvegarde numérique du patrimoine. Les domaines d'application s'ouvrent aujourd'hui à la paléontologie, l'entomologie, l'égyptologie, aux sciences de la terre et de la nature.

Mots clefs : numérisation 3D, microtomographie, rayons X, reconstruction, réalité virtuelle.

1- Principe de la tomographie Cone-Beam

Venant du scanner médical et basée sur la technologie de la radioscopie numérique, le principe de la tomographie est de reconstituer la structure interne de l'objet à partir d'une série de projections radioscopiques acquises sur une révolution complète.

1.1 - Projections radioscopiques et reconstruction 3D

Nous parlerons ici de systèmes tomographiques industriels, appliqués aux objets de musées, qui se différencient des tomographes médicaux principalement par le mode d'acquisition. Ici le tube à rayons X et le détecteur sont fixes, l'objet à analyser et/ou à numériser est mobile.

Les puissances de rayons X sont en outre généralement plus importantes que dans les appareils médicaux, et les temps d'exposition peuvent être plus longs.

La source de rayons X, dite microfoyer si le spot d'émission est d'environ 5 µm, et dans ce cas nous parlons de microtomographie, émet un faisceau conique sur l'objet ; l'image radioscopique de projection est générée par un système de détection numérique. Le système global simplifié est schématisé ci-dessous (Fig. 1).

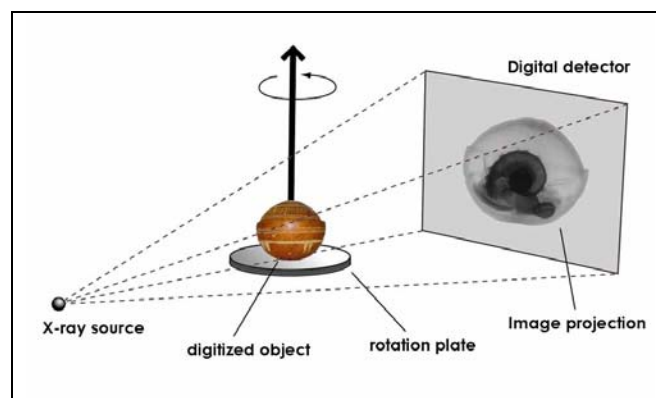


Fig. 1 - Principe d'acquisition en tomographie 3D

Le principe de la tomographie Cone-Beam [1] réside dans l'acquisition automatisée de plusieurs clichés radioscopiques numériques de l'objet en rotation. Le système est en effet usuellement équipé d'un plateau motorisé permettant la rotation pas à pas de l'objet sur un axe de rotation.

Il est courant de réaliser, par exemple, une acquisition de 360 radioscopies de l'objet en rotation sur une révolution complète autour d'un axe fixe, c'est-à-dire une acquisition automatisée d'une radioscopie par degré de rotation. (Fig. 2).

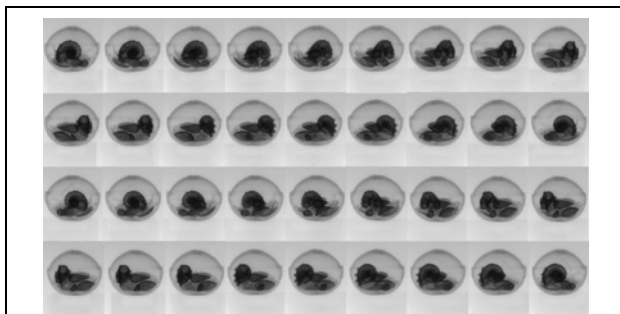


Fig. 2 - Acquisition automatisée d'une série de radioscopies numériques (échantillon d'images)

Un programme de reconstruction permet ensuite le passage d'images radioscopiques 2D en volume 3D. En technologie Cone-Beam, l'algorithme de reconstruction le plus utilisé est l'algorithme de Feldkamp [2], qui calcule la rétroprojection filtrée des données. Avec les logiciels de reconstruction les plus récents, le résultat de la reconstruction est directement obtenu en 3D, avec une représentation du volume en voxels. La visualisation volumique permet notamment la pénétration virtuelle dans l'objet et la découverte de sa structure interne. (Fig.3. – reconstruction 3D par tomographie X).

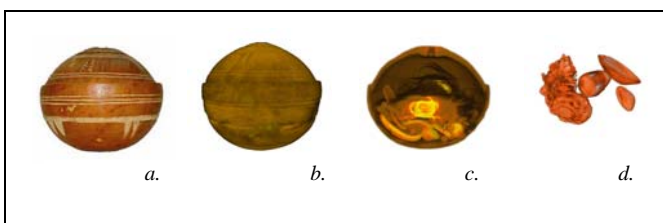


Fig. 3 – (a) Photo d'une boîte africaine sculptée fermée du Muséum d'Histoire Naturelle de Grenoble. (b) Visualisation externe 3D après reconstruction par tomographie X. (c) Vue 3D en coupe temps réelle. (d) Extraction virtuelle 3D des coquillages enfouis dans la boîte.

Chaque voxel, dénomination utilisée pour appeler les pixels volumiques, a une taille pouvant atteindre 5 microns dans le cas de la microtomographie.

En outre, les rayons X rendent état de la densité en chaque voxel reconstitué, ce qui offre à l'utilisateur des informations clés sur les matériaux enfouis à l'intérieur même de l'objet

(orientation des fibres du bois, bulles, fractures, etc.). Cela donne aussi la possibilité de segmenter les densités et de mettre en évidence chaque composant indépendamment, comme le montre l'extraction virtuelle des coquillages dans la figure 3.

1.2 – Les avantages de la tomographie 3D

Dans le domaine muséographique, on compare généralement la tomographie 3D aux technologies de numérisation 3D sans contact que sont principalement la technologie laser, et la technologie de lumière structurée.

Elle apporte, par rapport à ces technologies - dites optiques ou encore surfaciques - non seulement une numérisation de la surface extérieure d'une précision pouvant atteindre 5 microns (100 fois plus précis que le scanner médical) mais aussi et surtout la numérisation de l'intérieur des objets. Un autre avantage est l'absence de zones d'occultation (zones non numérisables en 3D au laser car inaccessibles ou comportant des surfaces noires, brillantes ou transparentes). Voici ci-dessous un exemple de ce qu'apporte la tomographie 3D par rapport à la numérisation laser en terme de qualité et de performance. (Fig. 4.).

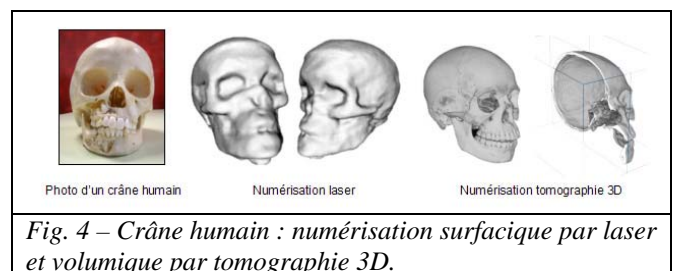


Fig. 4 – Crâne humain : numérisation surfacique par laser et volumique par tomographie 3D.

Une tomographie 3D peut être obtenue au bout de quelques minutes. La reconstruction est effectuée complètement par calcul, en ne faisant que très peu intervenir l'utilisateur.

Aujourd'hui, la tomographie 3D ne nécessite pas d'installation aussi lourde et complexe qu'auparavant, les temps d'acquisition et de reconstruction sont réduits, et les moyens informatiques de calcul, de traitement et de visualisation se réduisent à un simple PC de configuration standard équipé d'une carte graphique récente.

Il est maintenant de plus possible de transformer une installation de radioscopie micro foyer en microtomographe pour un moindre investissement.

2- Equipements et Manipulation

2.1 – Les installations de tomographie X

Il existe plusieurs types d'équipement de tomographie à Rayons X : cela va du synchrotron¹ pour les résolutions les plus fines (mettre l'échelle de résolution ??), jusqu'aux accélérateurs linéaires, en passant par les systèmes microtomographiques multi-échelles de dernière génération. Pour les exemples figurants dans cet article, les tensions d'émission de rayon X sont comprises entre 130kV et 160kV. Par comparaison, les tensions utilisées dans le

¹ European Synchrotron Radiation Facility - <http://www.esrf.fr/>

médical sont de l'ordre de 80kV à 100kV, et dans l'industrie nous parlons de tension souvent supérieure à 200kV pour des pièces manufacturées à forte densité. Cela peut aller jusqu'à 450kV, et même au delà sur des accélérateurs linéaires.

L'équipement utilisé dans ces exemples est un équipement dit industriel, radio-protégé par une cabine à parois plombées. Le tube est de technologie microfoyer – la taille du spot d'émission est d'environ 5 microns – et le système de détection est numérique, les radioscopiques acquises ont une résolution de 1024x1024 pixels chacune.

Les acquisitions ont été réalisées avec un pas de 1° sur une révolution complète, c'est-à-dire 360 projections, effectuées automatiquement en environ 10 minutes.

2.2 – Un exemple de tomographie 3D

Voici l'exemple de la numérisation d'un crâne de Gorille adulte. Ce crâne est issu de la Galerie de Paléontologie et d'Anatomie Comparée du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, et la numérisation 3D a été réalisée par Digisens avec la participation de l'Espace des Sciences de Rennes. (Fig. 5).



Fig. 5 – Positionnement et acquisition d'un crâne de gorille adulte dans la cabine de microtomographie multi-échelle à rayons X.

Le crâne, fixé par un support radiotransparent est posé sur le plateau tournant et la routine d'acquisition automatisée est lancée. Ensuite le programme de reconstruction réalise la modélisation 3D volumique du crâne en très haute résolution – 1024x1024x1024 voxels. La résolution obtenue est d'environ 200 microns.

Le modèle volumique obtenu (Fig. 6) peut être visualisé en 3D entier ou en plan de coupe en temps réel. Dans le cadre d'une exposition itinérante sur les Gorilles², quatre crânes d'humains et de gorilles ont été numérisés par tomographie 3D et présentés sur bornes interactives pour mettre en valeur la croissance des espèces et la comparaison d'anatomie entre les deux mammifères.

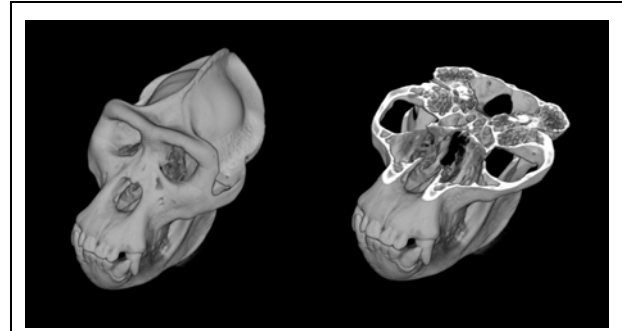


Fig. 6 – Résultats de la tomographie 3D par rayon X d'un crâne de Gorille : vue complète et vue avec coupe passant par le plan des orbites et révélant les cavités internes du crâne (sinus de la face, cavité cérébrale).

3- les applications en muséographie

Par sa puissance, sa rapidité et sa précision, la tomographie 3D trouve aujourd'hui des applications dans la plupart des domaines muséographiques. Cela reste toutefois *a priori* un outil de recherche et d'analyse, mais les besoins de mise en valeur, de vulgarisation et de pédagogie sont de plus en plus importants et la tomographie 3D y répond parfaitement.

Le domaine scientifique le plus actif aujourd'hui dans l'utilisation de la tomographie 3D est certainement la paléontologie. Nous avons ici un exemple de numérisation 3D effectuée sur un fossile datant de plus de 35 millions d'années. La tomographie 3D a non seulement permis de digitaliser la surface du fossile, mais aussi d'extraire virtuellement l'os de la gangue par segmentation 3D des densités, comme le montre la figure 7.

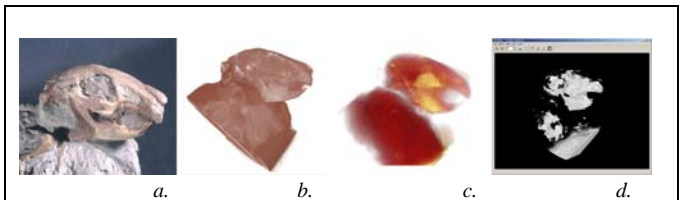


Fig. 7 – (a) Photo d'un paleolagus fossile. (b) Vue 3D externe après reconstruction tomographique 3D. (c) Affichage de la gangue en semi-transparence. (d) Extraction virtuelle des os du fossile après segmentation.

Dans un autre domaine, la tomographie 3D peut s'avérer utile voire indispensable pour mettre en évidence des défauts, des inclusions, ou des objets cachés. Sur les objets d'art, les applications vont de l'analyse d'antériorité sur des travaux de restauration à la détection de faux en passant par la simple numérisation 3D respectant les traits de l'artiste.

C'est sans doute dans les domaines de l'Histoire Naturelle que la tomographie a le plus grands nombre d'applications : paléontologie, anthropologie, entomologie, égyptologie, etc.

La tomographie 3D permet de mieux comprendre les objets analysés. L'exemple du Talisman malgache, objet

² Exposition « Gorille » organisée par l'Espace des Sciences de Rennes (Franck Raffégeau) et avec la collaboration du MNHN (Christine Berge).

d'ethnologie du Muséum de Lyon, est extrêmement démonstratif. (Fig. 8).

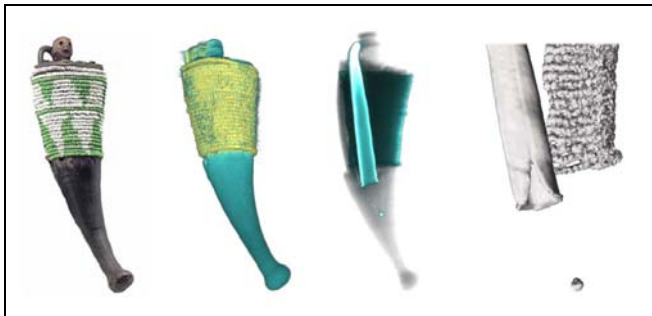


Fig. 8 - Talisman malgache : étude microtomographique 3D de la structure interne, découverte d'un crochet et d'une perle à l'intérieur (étude par segmentation des densités). Visualisation surfacique 3D après segmentation volumique et mise en évidence des éléments internes.

Grâce à la mise au point d'outils interactifs qui permettent une visualisation volumique en temps réel, les résultats de numérisation 3D par tomographie permettent d'appréhender les objets d'une manière virtuelle et communicante. La valorisation de la recherche, la pédagogie, et la vulgarisation scientifique sont ainsi des applications phares de cette nouvelle technologie.

4- Un exemple d'utilisation de la tomographie X pour des collections paléontologiques : le projet FOVEA

Le projet FOVEA [3,4] regroupe deux équipes de paléontologues, l'antenne l'Institut de Paléontologie humaine, Aix-en-Provence et le Centre Européen de Recherches Paléontologiques de Tautavel et trois équipes d'informaticiens, le Département Réalité Virtuelle de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, le Projet EPIDAURE de l'INRIA Sophia Antipolis et le département TSI, Signal image de Télécom Paris ,dans un programme de recherche ambitieux qui a plusieurs objectifs³ :

- modéliser complètement un site de fouille paléo-anthropologique,
- archiver exhaustivement les découvertes,
- assister les paléo-anthropologues dans leurs recherches,
- favoriser les collaborations scientifiques,
- diffuser les connaissances.

La tomographie X est ses applications esont au coeur du projet FOVEA à travers différents axes de recherche.÷

4.1 – Modélisation des fossiles

Les images tomographiques X sont de plus en plus utilisées pour l'étude des fossiles paléo-anthropologiques, en particulier du massif crânio-facial [54]. Les systèmes d'acquisition utilisés couramment en radiologie médicale permettent de discerner

des détails de 0,5 mm et les microtomographes spécialisés atteignent une résolution 100 fois supérieure. Des algorithmes de traitement d'images sont alors appliqués afin d'extraire la surface de la structure dans l'image et de visualiser. Plus généralement, ces algorithmes vont permettre au paléontologue d'interagir avec ces fossiles virtuels afin de les étudier. Par exemple, il peut combiner les représentations 3D de différents fragments osseux pour tester plusieurs hypothèses de reconstruction [6]. Il est d'ailleurs possible de synthétiser de nouveaux fragments par symétrie ou ajustement de la taille de fragments existants, mais aussi de modéliser les déformations taphonomiques afin de reconstituer la morphologie des fossiles avant leur étude paléoanthropologique.

Le paléontologue peut aussi visualiser facilement les structures internes des fossiles comme la forme du cerveau ou la structure de l'oreille interne par moulage endocrânien virtuel. Des outils d'analyse morphométrique 3D grâce à la possibilité d'acquisition de mesures complexes à effectuer sur le fossiles comme les épaisseurs pariétales permettent de réaliser des analyses comparatives réellement tridimensionnelles et mieux appréhender l'évolution morphologique de l'espèce humaine.

Enfin, des représentations concrètes peuvent être obtenues à partir des fossiles virtuels par les procédés de prototypage rapide (stéréolithographie ou frittage de poudre de polyamide).

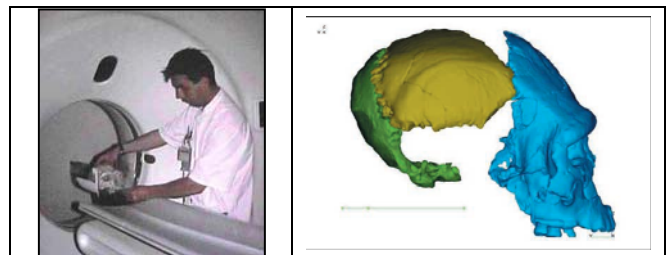


Fig. 9 Acquisition par tomographie X d'un crâne préhistorique. Reconstruction assistée par ordinateur d'un crâne d'Homo Erectus.

4.2 – Modélisation d'outils paléo-anthropologiques

Il un besoin de représentation en trois dimensions des outils de pierre taillée préhistoriques pour en réaliser l'étude scientifique descriptive puis comparative et pour en faciliter la présentation muséographique. En l'absence actuelle d'outil de modélisation 3D, les préhistoriens utilisent aujourd'hui des dessins des différentes faces des outils ou des photos prises sous plusieurs angles. Une modélisation numérique 3D simplifierait la tâche des paléontologues : elle serait plus facile à « manipuler » par rapport à l'outil original qui est lourd et fragile. Elle offre de plus l'avantage d'être copiable et transportable sur support numérique dont Internet et peut même être restituée concrètement à nouveau par prototypage.

Dans le cadre du Projet FOVEA [7], 2 outils préhistoriques (moulages d'un Chopping Tool - 122x124x44 mm - et d'un Chopper - 186x100x32 mm, en provenance du site de Terra

³ Coordonné par Bertrand Mafart et Gérard Subsol, le projet FOVEA est financé par le Programme Interdisciplinaire Société de l'Information Archivage et patrimoine documentaire du CNRS.

Amata et datés d'environ 300 000 ans⁴) ont été numérisés en 3D par 5 dispositifs différents : stéréophotographie, scanner laser Cyberware, scanner laser Minolta Vivid 900, système passif expérimental de Télécom Paris fondé sur des images couleur en haute résolution et tomographe X médical. La tomographie X a fourni une image d'une résolution de 0,3 mm x 0,3 mm x 1,0 mm qui permet d'obtenir des modèles 3D très précis des outils (plusieurs centaines de milliers de facettes).

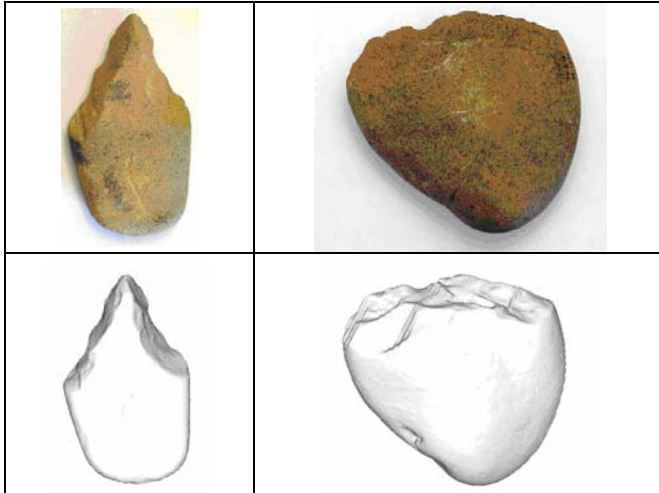


Fig. 10 - Les deux outils préhistoriques : chopper et chopping tool et les modèles 3D (~200 000 facettes obtenus par tomographie X)

Le grand avantage du tomographe X est de donner en une seule acquisition rapide et précise une image 3D alors que les autres dispositifs ne fournissent que des données 3D partielles. L'utilisateur doit alors « rabouter » semi-automatiquement ces différents jeux de données 3D pour obtenir un modèle 3D plus ou moins complet. De surcroît, des problèmes de spéularité ou de saturation brulent les systèmes laser.

L'inconvénient majeur du tomographe X, outre son coût et l'impossibilité de le transporter, est qu'il ne permet pas d'obtenir la « texture » de l'objet.

4.3 – Un exemple d'application muséographique

La tomographie X a permis d'obtenir un modèle 3D du massif crânio-facial de l'Homme de Tautavel (daté d'environ 450 000 ans) et d'un homme moderne. Une étude morphométrique [4] fondée sur des outils automatiques a permis de mettre en valeur, de visualiser et quantifier des différences morphologiques. Il a alors été décidé de réaliser une vidéo [86] en image de synthèse fondée sur ces résultats. Celle-ci a été présentée en 2000 pendant plusieurs mois dans le cadre de l'exposition « Homo Erectus à la conquête du monde » au Musée de l'Homme à Paris (Fig. 11). Elle a permis au grand public d'appréhender rapidement et en 3D les principales différences morphologiques entre un crâne contemporain et un crâne préhistorique (crâne bas, front fuyant, pommettes saillantes, face proéminente).

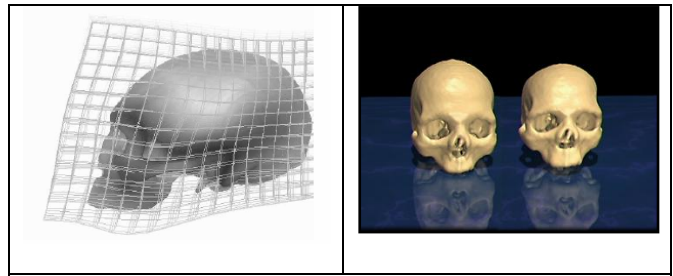


Fig.11 Utilisation de modèles 3D issus de la tomographie X pour une présentation muséographique.

5- Bibliographies

- [1] Wang, G., Lin, T. H., Shinozaki, D. M., Kim, H. G., and Cheng, P. C. *Cone-beam x-ray microtomograph*. In Cheng, P. C. et al., editor, *Multi-dimensional microscopy*, chapter 9, pages 151-169. Springer-Verlag, NY.
- [2] Feldkamp, L. A., Davis, L. C., and Kress, J. W. *Practical cone-beam algorithm*. *J. Opt. Soc. Am.*, 1 (A):612-619.
- [3] Site Web: <http://foveaproject.free.fr/>
- [4] G. Guipert, G. Subsol, J.P. Jessel, H. Delingette, B. Mafart. "The FOVEA Project: a New Look at Human Past". *9th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, Montreal (Canada), October 2003.
- [5] G. Subsol, B. Mafart, A. Silvestre, M.A. de Lumley. "3D Image Processing for the Study of the Evolution of the Shape of the Human Skull: Presentation of the Tools and Preliminary Results". *XIV International Congress of Prehistoric and Protohistoric Science*, Liège (Belgium), In: B. Mafart and H. Delingette with the collaboration of G. Subsol (eds.) *Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology*, British Archaeological Reports International Series 1049, 37-45, 20
- [6] Guipert G., De Lumley M.A., De Lumley H., Mafart B. . Three-dimensional imagery: a new look at the Tautavel Man. In *Enter the Past. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. Stadtarchäologie Wien (Eds). *Archaeopress. BAR International series 1227*, 2004, 100-102.
- [7] Q. Borderie. "Numérisation 3D de matériel paléanthropologique". Master's Thesis, D.E.A., University of Nice - Sophia Antipolis / ESINSA (France), September 2004.
- [8] B. Mafart, D. Méline, A. Silvestre, G. Subsol. "3D Imagery and Paleontology: Shape differences between the skull of Modern Man and that of Tautavel Man". B. Hidoine, A. Paouri (designers and directors). Video 451-452. INRIA Multimedia Scientific Communication Department, 1999.

⁴ Les moulages de ces deux outils ont été confiés par l'Institut de Paléontologie Humaine (Directeur : Pr Henry de Lumley).