

# TRAITEMENT D'IMAGES SCANOGRAPHIQUES APPLIQUÉ À L'ÉTUDE TRIDIMENSIONNELLE DE L'ÉVOLUTION DE LA FORME DU CRÂNE HUMAIN

Gérard Subsol\*  
Bertrand Mafart\*\*  
Denis Méline\*  
Alain Silvestre\*\*\*  
Marie-Antoinette de Lumley\*\*

---

## Mots-clés

Crâne, scanographie, traitement d'images tridimensionnelles, lignes de crête, recherche automatique de correspondances entre points, morphométrie, analyse des déformations, reconstruction faciale, Homme de Tautavel.

## Résumé

Nous présentons une méthode automatique qui permet de visualiser et d'analyser, en trois dimensions, l'évolution de la forme du crâne humain à partir d'images scanographiques. Un premier algorithme extrait automatiquement des lignes de crête à partir des scanographies d'un crâne d'un Homme moderne et du moulage du crâne d'un Homme préhistorique. Ces lignes correspondent aux lignes saillantes de la surface crânienne. Elles servent de repères à un algorithme de mise en correspondance pour trouver automatiquement les points homologues entre les deux crânes. A partir de ces points appariés, on calcule une transformation de l'espace qui superpose les deux crânes. Cette transformation peut ensuite être interpolée pour créer des transformations intermédiaires. A partir de l'image scanographique, on extrait alors un modèle surfacique du crâne de l'Homme moderne auquel sont successivement appliquées les transformations intermédiaires pour visualiser l'évolution du crâne entre l'Homme préhistorique et moderne. Nous appliquons cette méthode au crâne de l'Homme de Tautavel, daté d'environ 450 000 ans, et nous présentons des applications futures en reconstruction faciale et en analyse morphométrique tridimensionnelle.

## Abstract

We present an automatic method that allows one to visualize and analyze, in three dimensions, the evolution of the shape of the human skull from CT-Scan images. A first algorithm automatically extracts the crest lines from CT-Scan images of the skull of a modern Man and of a cast of a skull of a prehistoric Man. Those lines correspond to the salient lines of the skull surface. They will be used as landmarks to automatically find the homology points between the two skulls. Based on these couples of matched points, we compute a volumetric transformation that superposes the two skulls. This transformation can be interpolated to obtain intermediary transformations. We extract then a surface model of the skull of the modern Man and we apply successively the intermediary transformations to visualize the evolution of the skull between the prehistoric and the modern Man. We have applied this method to the skull of the Man of Tautavel, dated of about 450 000 years, and we present future applications in facial reconstruction and tridimensional morphometry.

---

\*Projet EPIDAURE, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, Sophia Antipolis [e-mail : Gerard.Subsol@sophia.inria.fr]

\*\*Laboratoire d'Anthropologie, Faculté de Médecine, UMR 6569, Université de la Méditerranée, Marseille

\*\*\*Hôpital d'Instruction des Armées Laveran, Marseille

## INTRODUCTION

Les images scanographiques sont de plus en plus utilisées en paléo-anthropologie, en particulier pour l'étude du massif crânio-facial. Le fossile étudié - crâne, os isolés ou leurs moulages - est placé dans un scanographe (figure 1). On obtient alors, en quelques minutes, une série de plusieurs dizaines d'images numériques représentant les coupes successives de la structure. Ces images, en général de résolution 512x512 pixels et comportant plusieurs milliers de niveaux de gris, sont ensuite « empilées » pour former une image tridimensionnelle. Les systèmes d'acquisition utilisés couramment en radiologie médicale permettent de discerner des détails de 1 mm de côté et les micro-scanographes spécialisés atteignent une résolution de 100 microns [22].

Des algorithmes de traitement d'images, issus de l'imagerie médicale [2] ou de la Conception Assistée par Ordinateur, sont alors appliqués afin d'extraire la surface de la structure dans l'image et de la visualiser sous tous les angles sur un écran d'ordinateur. Plus généralement, ces algorithmes vont permettre au paléontologue d'interagir avec ces fossiles virtuels afin de les étudier [23, 24]. Par exemple, il peut combiner les représentations tridimensionnelles de différents fragments osseux pour tester plusieurs hypothèses de reconstruction [11, 5, 22, 13]. Il est possible de synthétiser de nouveaux fragments par symétrie ou ajustement de la taille de fragments existants, mais aussi de modéliser les déformations taphonomiques dues aux mouvements géologiques [22]. Le paléontologue peut aussi visualiser facilement les structures internes des fossiles virtuels, comme l'endocrâne [6, 7, 13], le labyrinthe de l'oreille interne [16, 22, 13], les sinus frontaux [22] ou paranasaux [13]. Des outils de morphométrie permettent d'obtenir aisément des mesures complexes à prendre dans la réalité, comme l'épaisseur des parois osseuses [24] ou le rayon de courbure des canaux semi-circulaires [22, 13] et de réaliser des analyses tridimensionnelles de la forme des structures (voir les articles de J. Treil *et al.* et C. Madrid *et al.*). Enfin, de nouveaux moulages peuvent être obtenus par stéréolithographie à partir des fossiles virtuels [15].

Dans cet article, nous présentons une méthode utilisant des algorithmes de traitement d'image, qui permet d'analyser en trois dimensions l'évolution de la forme du crâne humain, à partir d'images scanographiques. Nous calculons d'abord une transformation tridimensionnelle qui déforme la surface du crâne d'un Homme moderne vers un crâne fossile. Comme proposé par Thompson [21], nous pouvons alors visualiser cette transformation pour mettre en évidence les différences morphométriques entre les deux crânes et l'utiliser pour obtenir une reconstruction faciale de l'Homme préhistorique. Nous présentons des résultats obtenus à partir d'une scanographie (61 coupes d'épaisseur 3 mm composées de 512x512

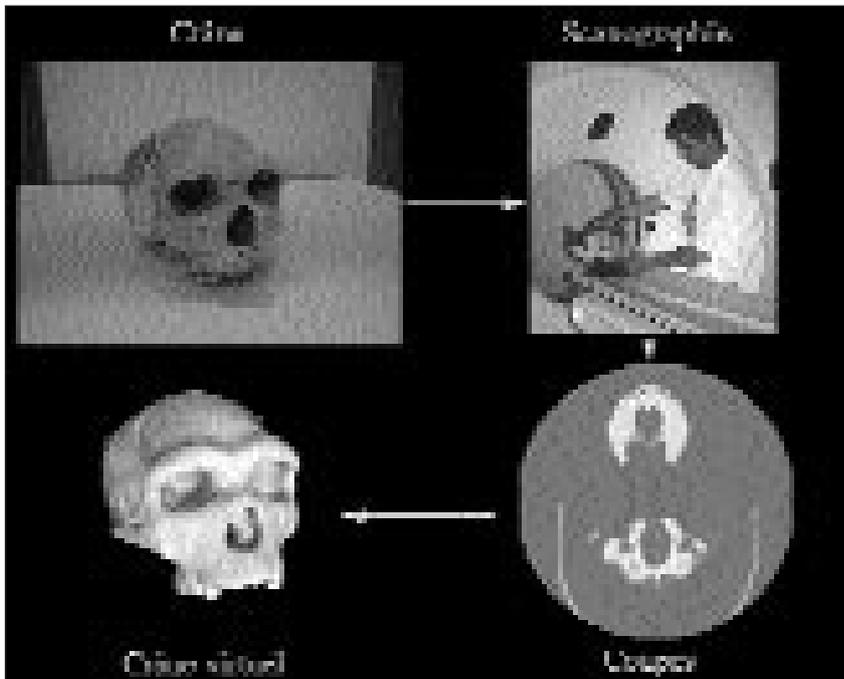


Figure 1 - la structure anatomique ou son moulage est placée dans le scanographe. On obtient alors une série de plusieurs dizaines d'images numérisées de coupes, de 512x512 pixels en niveaux de gris. Il est alors possible d'« empiler » ces coupes et de détourer automatiquement la surface de la structure pour en obtenir une représentation tridimensionnelle.

pixels de 0,6 mm) d'un crâne sec d'un Homme moderne fournie par G. Quatrehomme de l'Université de Nice et une scanographie du moulage de la reconstitution du crâne de l'Homme de Tautavel (154 coupes d'épaisseur 1 mm, composées de 512x512 pixels de 0,5 mm). Cette reconstitution (ou chimère) associe la face (Arago XXI) et le pariétal droit (Arago XLVII) retrouvés dans la grotte de l'Arago à Tautavel en 1971, un pariétal gauche obtenu par symétrie, un moulage de l'occipital de Swanscombe et le temporal ainsi que son symétrique de Sangiran 17 (Pithécantrophe VIII) [12].

## PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE

### 1) EXTRACTION DE LIGNES ET DE POINTS CARACTÉRISTIQUES

Pour calculer la transformation, nous devons d'abord trouver des repères sur la surface du crâne. Ceux-ci doivent avoir une définition mathématique pour être extraits automatiquement dans les images scanographiquement dans les images scanographiques et une signification anatomique afin d'être caractéristiques de la

structure étudiée. Nous avons choisi d'utiliser les lignes de crête [17, 18, 19], qui sont définies par les extremums de la courbure principale maximale en valeur absolue, suivant la direction principale associée. Elles correspondent aux lignes saillantes de la surface et mettent bien en valeur les contours des orbites et de la cavité nasale, les tempes, les pommettes, les lignes mandibulaires et, à l'intérieur du crâne, les os sphénoïdes et temporaux, ainsi que le trou occipital (figure 2).

Des lignes similaires, appelées *ridge lines* et extraites sous la supervision d'un anatomiste, ont été utilisées pour se repérer dans les opérations maxillo-faciales [4], pour caractériser des pathologies crânio-faciales [8] et, en paléontologie, pour comparer l'*Homo erectus* et l'*Homo sapiens* [10]. Nous avons pu vérifier [17, 18] que les lignes de crête et les *ridge lines* d'un même crâne étaient très proches.

## 2) RECHERCHE DES CORRESPONDANCES ENTRE LES POINTS CARACTÉRISTIQUES

Pour le crâne de l'Homme moderne, nous avons obtenu 536 lignes composées de 5756 points et pour celui de l'Homme de Tautavel, 337 lignes comprenant 5417 points (figure 3). Il faut maintenant trouver les correspondances entre les points et celles-ci ne peuvent être déterminées qu'automatiquement vu leurs nombres. Il s'agit du problème classique en traitement

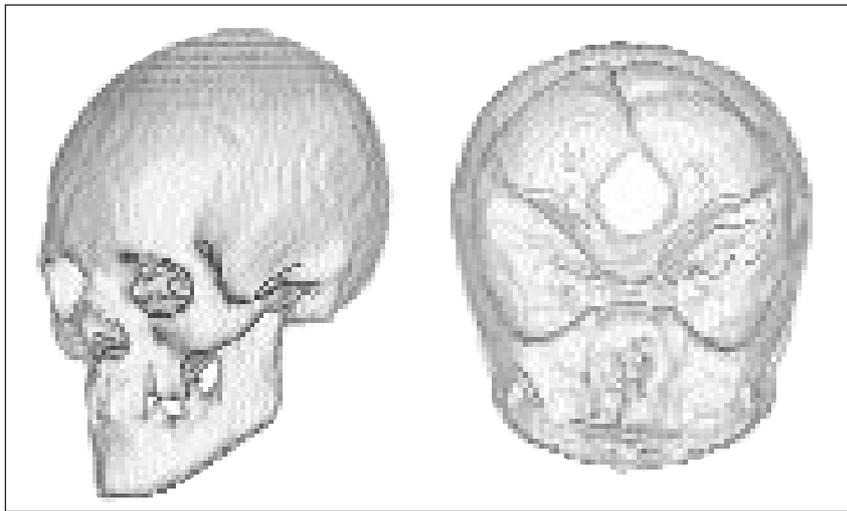


Figure 2 - lignes de crête extraites à partir d'une scanographie du crâne d'un Homme moderne. Nous pouvons remarquer que ces lignes mettent bien en valeur les contours des orbites, et de la cavité nasale, les tempes, les pommettes ou les lignes mandibulaires. A l'intérieur du crâne, les lignes suivent les os sphénoïdes et temporaux et caractérisent le trou occipital.

d'images tridimensionnelles de la mise en correspondance [2]. Nous avons développé un algorithme décrit précisément dans [17, 18] qui déforme itérativement et continûment le premier ensemble de lignes vers le second afin de les superposer. A la fin du processus, on met en correspondance chaque point  $P_i$  du premier ensemble avec le point  $Q_i$  qui est son plus proche voisin dans le second ensemble, puis on élimine certains appariements incohérents. Dans notre exemple, l'algorithme trouve, en quelques minutes sur une station de travail classique,  $N = 1532$  appariements de points. Comme les points appariés sont répartis sur toute la surface - extérieure et intérieure - du crâne, nous allons pouvoir analyser la structure en trois dimensions dans sa globalité.

Nous avons vérifié sur d'autres données de crâne [20] que les appariements ainsi obtenus étaient cohérents, d'une part, avec les résultats obtenus par une autre méthode automatique et, d'autre part, avec les couples de points homologues identifiés manuellement par un anatomiste. Il reste cependant à quantifier précisément les erreurs d'appariements, en particulier en les comparant aux mesures statistiques d'incertitude sur la localisation manuelle de points homologues.

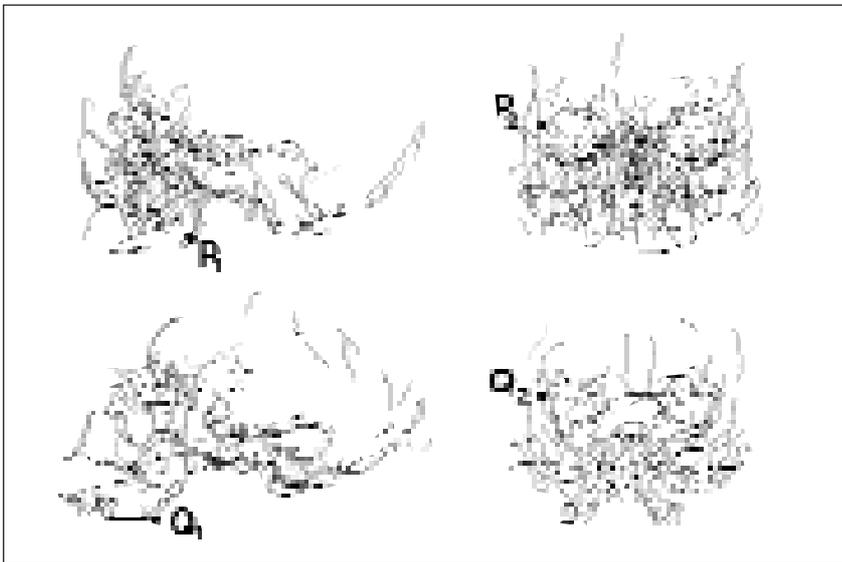


Figure 3 - lignes de crête sur la surface du crâne d'un Homme moderne (en haut, 536 lignes et 5756 points) et de l'Homme de Tautavel (en bas, 337 lignes et 5417 points). Le problème est de trouver les correspondances entre les points de repère, par exemple les appariements  $(P1, Q1)$  ou  $(P2, Q2)$ .

### 3) NORMALISATION GÉOMÉTRIQUE DES STRUCTURES ÉTUDIÉES

Afin de n'étudier par la suite que les différences de morphologie pure, nous devons faire abstraction des différences de taille, de position et d'orientation [9]. Les transformations mathématiques correspondantes - homothétie, translation et rotation - peuvent être calculées par la méthode de Procrustes (voir l'article d'A. Maitre-robot). Nous avons choisi une formule mathématique légèrement différente en calculant une similitude par minimisation aux moindres carrés des distances entre les couples de points appariés [17, 18].

### 4) CALCUL DE LA TRANSFORMATION ENTRE LES DEUX STRUCTURES

Pour obtenir une fonction de déformation de l'espace entre les deux crânes, alignés et normalisés en taille, nous pourrions utiliser la méthode des Thin-Plate Spline [3], couramment utilisée en morphométrie bidimensionnelle (voir l'article de M. Friess). Elle permet de calculer une fonction de déformation de l'espace qui interpole les déplacements entre les couples de points appariés ( $P_i$ ,  $Q_i$ ) et possède certaines propriétés mathématiques de régularité. Cependant, dans notre cas, les points ne sont pas répartis uniformément dans l'espace. Ainsi, la fonction ne sera bien définie qu'autour des lignes de crête où se trouvent les points et n'aura que peu de signification ailleurs. De surcroît, nous devons raisonnablement supposer qu'une minorité d'appariements est incorrect. Si la fonction doit les interpoler, nous obtiendrons une transformation très sensible à la moindre erreur. A cause de ces deux difficultés, nous risquons d'obtenir une fonction Thin-Plate Spline très irrégulière, qui ne représenterait pas une évolution continue de la forme du crâne.

Aussi, nous avons choisi de chercher une fonction qui n'est qu'une approximation des déplacements entre les couples de points, mais dont nous pouvons paramétrer la régularité. Elle est définie par un produit tensoriel de B-splines cubiques [17]. Pour calculer cette fonction de transformation  $T$  de l'espace, nous optimisons la somme pondérée d'un critère d'approximation (somme des distance au carré entre  $T(P_i)$  et  $Q_i$ ) et d'un critère de régularisation (minimisation de la dérivée seconde qui représente la « courbure » de la fonction) proche de celui des fonctions du type Thin-Plate Spline.

En jouant sur le paramètre de pondération  $\rho$  l'utilisateur peut favoriser l'approximation ou la régularité pour obtenir une transformation plus précise ou plus lisse.

$$T = \arg \min \sum \|T(P_i) - Q_i\|^2 + \rho \iiint_{\mathcal{R}^3} (\delta^2 T / \delta a^2) + (\delta^2 T / \delta y^2) + (\delta^2 T / \delta z^2) + (\delta^2 T / \delta x \delta y) + (\delta^2 T / \delta x \delta z)$$

## APPLICATION À L'ÉTUDE DU CRANE DE L'HOMME DE TAUTAVEL

### 1) ÉTUDE VISUELLE DE LA DÉFORMATION

En appliquant la transformation à un maillage tridimensionnel régulier, nous pouvons visualiser les différences entre les structures anatomiques [18]. Nous constatons, figure 4, que le maillage déformé met bien en évidence les principaux caractères anatomiques du crâne de l'Homme de Tautavel - crâne bas, front fuyant, pommettes saillantes, face proéminente - ainsi que la dissymétrie de la face due à des fractures et déformations post mortem du fossile dans le sol.

### 2) RECONSTRUCTION FACIALE

A partir de la scanographie (62 coupes d'épaisseur 3 mm, composées de 512 x 512 pixels de 0,6 x 0,6 mm) du moulage facial de l'Homme moderne, nous avons obtenu

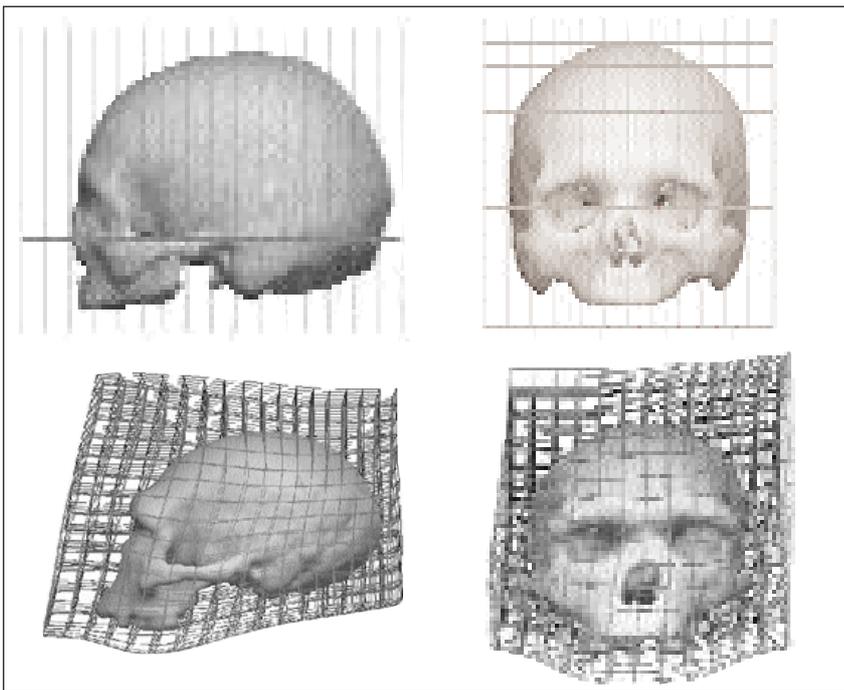


Figure 4 - visualisation de la transformation entre le crâne d'un Homme moderne (en haut) et celui de l'Homme de Tautavel (en bas). Le maillage déformé met bien en évidence le crâne bas, le front fuyant, les pommettes saillantes, la face proéminente du crâne de l'Homme de Tautavel ainsi que la dissymétrie de la face due à des fractures et déformations post mortem du fossile dans le sol.

nu la surface tridimensionnelle du visage. Nous avons alors aligné celle-ci avec la surface du crâne correspondant et nous avons appliqué la transformation suivant la méthode décrite dans [14]. Comme nous supposons que la forme du visage suit celle du crâne, nous obtenons une reconstruction du visage de l'Homme de Tautavel (figure 5). Ce premier résultat est à comparer à ceux obtenus par des spécialistes en reconstruction faciale (voir les articles de G. Odin *et al.*, T. Balaguer *et al.*, J.N. Vignal ainsi que le site Web : <http://www.culture.fr/culture/arcnat/tautavel/francais/hominter.htm>).

#### CONCLUSION

Le calcul automatique de la déformation que nous avons présenté ouvre un champ extrêmement vaste de possibilités d'étude de l'évolution d'une structure anatomique. Dans un premier temps, nous pouvons décomposer la déformation afin de quantifier l'évolution tridimensionnelle de différentes sous-structures. Nous pouvons aussi établir des statistiques afin de construire des modèles moyens et définir des distances morphométriques entre différentes structures fossiles, ce qui pourrait aider à leur classification [10, 17]. C'est dans ce but que nous sommes en train de constituer une base de données de scanographies à haute résolution de crânes fossiles. Tous ces travaux nécessitent une étroite collaboration entre des radiologues, des informaticiens et des paléanthropologues afin de résoudre les nombreux problèmes en traitement d'image, en mathématique, en statistique, en morphométrie, en anatomie, en paléontologie et en anthropologie.

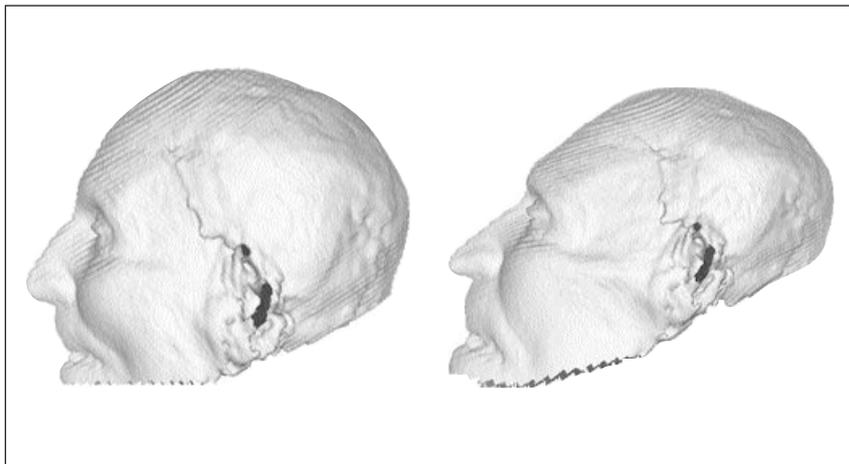


Figure 5 - une expérience de reconstruction faciale de l'Homme de Tautavel (à droite) en appliquant la transformation à la surface du visage de l'Homme moderne (à gauche).

Toute cette méthodologie peut aussi s'appliquer à l'étude du crâne lors de la croissance [1, 17]. En particulier, le calcul de la déformation du crâne, à partir de scanographies acquises à divers instants de la croissance, permettrait de mieux appréhender en trois dimensions les déplacements complexes des pièces squelettiques (voir l'article de M.J. Deshayes).

Enfin, nous disposons au sein de notre équipe de recherche, de nombreux algorithmes de traitement d'images, en particulier pour détourer automatiquement des structures ou pour trouver automatiquement leur plan de symétrie. Nous comptons appliquer ces outils à l'étude des dissymétries crâniennes et à l'analyse morphométrique de l'endocrâne.

#### Références bibliographiques

1. Andresen P.R., Nielsen M., Kreiborg S., 1998 - 4D Shape-Preserving Modelling of Bone Growth. In : *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, W.M. Wells, A. Colchester, S. Delp, éditeurs, **1496**. Lecture Notes in Computer Science, 710-719, Boston (Etats-Unis), octobre 1998. Version électronique : <http://www.lab3d.odont.ku.dk/~pra/>.
2. Ayache N., 1998 - L'analyse automatique des images médicales. État de l'art et perspectives. *Annales de l'Institut Pasteur, actualités*, vol. **IX**, n° 1, 13-21. Version électronique : <http://www-sop.inria.fr/epidaure/personnel/Nicholas.Ayache/prospective/pasteur.html>.
3. Bookstein F.L., 1991 - Morphometric tools for landmark data. Cambridge University Press.
4. Bookstein F.L. & Cutting C., 1988 - A proposal for the apprehension of curving cranofacial form in three dimensions. In : *Cranofacial Morphogenesis and Dysmorphogenesis*, K. Vig et A. Burdi, éditeurs, 127-140.
5. Braun M., Bouchet P., Hublin J.-J. & Mallet J.-L. 1999 - Les reconstitutions virtuelles des hommes préhistoriques. *Dossier Pour la Science : Les origines de l'humanité*, 78-81, janv. 1999.
6. Conroy G.C., Vannier M.W. & Tobias P.V., 1990 - Endocranial Features of Australopithecus africanus Revealed by 2- and 3-D Computer Tomography. *Science*, **247** : 838-841.
7. Conroy G.C., Weber G.W., Seidler H., Tobias P.V., Kane A., Brunnsden B., 1998 - Endocranial Capacity in an Early Hominid Cranium from Sterkfontein, *South Africa*. *Science*, **280**, 1730-1731, 12 juin 1998. Résumé électronique : <http://www.artsci.wustl.edu/~anthro/ct.html>.
8. Cutting C., Dean D., Bookstein F.L., Haddad B., Khorramabadi D., Zonneveld F.Z., & Mc Carthy J., 1995 - A Three-dimensional Smooth Surface Analysis of Untreated Crouzon's Disease in the Adult. *Journal of Craniofacial Surgery*, **6** : 444-453.
9. David B. & Laurin B., 1989 - Déformations ontogénétiques et évolutives des organismes : l'approche par la méthode des points homologues. *C.R. Acad. Sci., Paris*, **II**, **309** : 1271-1276.
10. Dean D., 1993 - *The Middle Pleistocene Homo erectus/Homo sapiens Transition : New Evidence from Space Curve Statistics*. PhD Thesis, The City University of New York.
11. Kalvin A.D., Dean D. & Hublin J.-J., 1995 - Reconstruction of Human Fossils. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **15**, 1, 12-15. Version électronique : <http://www.ibm.com/sfasp/arch.html>

12. Lumley H. de, Lumley M. A. de & David R., 1982 - Découverte et reconstruction de l'Homme de Tautavel. *Pré-actes du 1er congrès de paléontologie humaine*, **1**, Nice (France).
13. Ponce de LeÓN M.S. & Zollikofer C.P.E., 1999 - New Evidence from Le Moustier 1 : Computer Assisted Reconstruction and Morphometry of the Skull. *The Anatomical Record*, **254**, 474-489.
14. Quatrehomme G., Cotin S., Subsol G., Delingette H., Garidel Y., Grevin G., Fidrich M., Bailet P. & Ollier A., 1997 - A Fully Three-Dimensional Method for Facial Reconstruction Based on Deformable Models. *Journal of Forensic Sciences*, **42**, (4), 649-652.
15. Seidler H., Falk D., Stringer C., Wilfing H., Müller G.B., zur Nedden D., Weber G.W., Reicheis W., Arsuaga J.-L., 1997 - A comparative study of stereolithographically modelled skulls of Petralona and Broken Hill : implications for future studies of middle Pleistocene hominid evolution. *Journal of Human Evolution*, **33**, 691-703.
16. Spoor F. & Zonneveld F., 1995 - Morphometry of the primate bony labyrinth : a new method based on high resolution computed tomography. *Journal of Anatomy*, **186**, 271-286.
17. Subsol G., 1995 - *Construction automatique d'atlas anatomiques morphométriques à partir d'images médicales tridimensionnelles*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, déc. 1995. Version électronique : <http://www.inria.fr/RRRT/TU-0379.html>.
18. Subsol G., Thirion J.-P., Ayache N. 1998 - A General Scheme for Automatically Building 3D Morphometric Anatomical Atlases : application to a Skull Atlas. *Medical Image Analysis*, **2** (1), 37-60. Résumé électronique : <http://www.oup.co.uk/media/j>.
19. Thirion J.-P. & Gourdon A. - The 3D Marching Lines Algorithm. *Graphical Models and Image Processing*, **58** (6), 503-509. Version électronique : <http://www.inria.fr/RRRT/RR-1881.html>.
20. Thirion J.-P., Subsol G. & Dean D., 1996 - Cross Validation of Three Inter-Patients Matching Methods. In : *Visualization in Biomedical Computing*, K.H. Höhne, R. Kikinis, éditeurs, **1131**. Lecture Notes in Computer Science, : 327-336, Hamburg (Allemagne). Springer.
21. Thompson d'A.W., 1917 - *On Growth and Form*. Bonner, J.T. éditeur. Cambridge University Press.
22. Thompson J.-L. & Illerhaus B., 1998 - A new reconstruction of the Le Moustier 1 skull and investigation of internal structures using 3-D- $\mu$ CT data. *Journal of Human Evolution*, **35**, 647-665
23. Weber G.W., Recheis W., Seidler H., Scholze I., 1998 - Virtual Anthropology - Methodological Aspects of Measurements. *American Journal of Physical Anthropology - Suppl.* **26** : 228. Voir aussi le site Web : <http://www.anthro.univie.ac.at/virtanth/virtanth.html>
24. Zollikofer C.P.E., Ponce de LeÓN M.S., Martin R.D., 1998 - Computer-Assisted Paleoanthropology. *Evolutionary Anthropology*, **6**, 41-54.