

[G. Subsol. "Traitement automatique d'images scanographiques tridimensionnelles pour l'étude de fossiles paléo-anthropologiques : le problème de la définition des repères 3D". 132e Congrès National des Sociétés Historiques et Scientifiques - Images et imagerie - Imageries et images en paléanthropologie Workshop, Arles (France), April 2007. Paper to be published in the proceedings in 2008]

## Traitement automatique d'images tridimensionnelles pour l'étude morphométrique de fossiles paléanthropologiques : le problème de la définition des repères 3D

Gérard Subsol  
Chargé de Recherche CNRS  
LIRMM - UMR5506  
161 rue Ada, 34392 Montpellier Cedex 5 - France

Tél. : (+33) (0)4 67 41 85 88  
gerard.subsol@lirmm.fr  
<http://www.lirmm.fr/~subsol/>

### Résumé

L'imagerie 3D est de plus en plus utilisée en paléo-anthropologie pour l'étude des fossiles. Cependant, les images obtenues contiennent une quantité gigantesque d'informations difficile à appréhender. Aussi, il devient nécessaire d'appliquer des traitements automatiques aux images pour assister le paléanthropologue dans ses recherches. Une étape fondamentale consiste à définir des repères 3D sur le fossile afin de pouvoir le comparer à d'autres à travers une analyse morphométrique. Nous proposons dans cet article de dresser un état de l'art sur les algorithmes de traitement automatique d'images tridimensionnelles qui permettent de localiser de tels repères. Dans un premier temps, nous analyserons les types de repères qu'il est envisageable de détecter automatiquement puis nous listerons quelques méthodes issues des travaux récents en informatique et analyserons les résultats obtenus. Enfin, nous essaierons de définir quelques pistes de recherche.

**Mots-clefs :** image 3D, paléanthropologie, informatique, traitement d'images, repères, morphométrie

### 1. Introduction

Aujourd'hui, l'imagerie 3D est fréquemment utilisée en paléo-anthropologie pour étudier les structures fossiles. Les premiers résultats ont été obtenus en utilisant la scanographie X dès le début des années 80 (Tate & Cann, 1982). Depuis, de nombreux chercheurs, paléontologues ou radiologues, ont appliqué cette modalité d'imagerie qui permet de bien discerner les structures osseuses avec une résolution d'environ 0,1 mm pour les systèmes médicaux courants. Ceci dit, il subsiste encore de nombreux problèmes de réglage pour obtenir des images de très bonne qualité (Badawi-Fayad et coll., 2005).

Plus récemment, de nouveaux dispositifs sont apparus. Ainsi, la microtomographie X permet d'atteindre une précision dix fois plus importante (Noel et coll., 2005). La microtomographie par synchrotron qui n'est disponible en France qu'à l'ESRF de Grenoble (et peut-être prochainement au centre SOLEIL de Gif-sur-Yvette) se révèle particulièrement adaptée à l'imagerie paléanthropologique et de nombreux résultats ont déjà été publiés (Mazurier et coll., 2006) (Tafforeau et coll., 2006). Cependant, l'accès au rayonnement synchrotron et le paramétrage de l'acquisition nécessitent une grande expertise et une longue préparation.

Certains chercheurs ont proposé d'utiliser l'Imagerie par Résonance Magnétique (Steiger, 2001) (Clark et coll., 2004) qui est couramment utilisée dans le domaine médical. Le signal IRM est caractéristique d'une résonance des atomes d'hydrogène ce qui permet de détecter la présence d'eau dans les tissus mous mais absolument pas les structures osseuses ou minéralisées. De ce fait, on doit préalablement immerger les fossiles dans un liquide afin d'obtenir une image de leurs « empreintes ». Il suffit alors d'inverser l'image pour récupérer les informations sur l'échantillon.

Le gros avantage de la modalité IRM est qu'elle peut discerner des détails cachés par des artefacts inhérents à la technologie de la scanographie X.

Enfin plus récemment des chercheurs ont proposé d'utiliser la tomographie par neutrons (Schwarz et coll., 2005). Cette modalité est fondée sur un principe équivalent à la scanographie X mais utilise des neutrons qui ont une interaction différente avec les matériaux. De ce fait, la tomographie par neutrons est complémentaire de la scanographie X puisqu'elle permet de mieux distinguer certaines inclusions ou sédiments internes même si sa résolution reste limitée.

Toutes ces modalités d'imagerie fournissent une image tridimensionnelle  $I(x,y,z)$  où  $x$ ,  $y$  et  $z$  représentent les coordonnées entières d'un point de l'image (qu'on peut relier aux coordonnées d'un point dans l'échantillon) et  $I$  est le signal reçu, caractéristique de la matière en ce point là. Dans le cas de la scanographie X,  $I$  représente une « densité » osseuse alors que pour l'IRM,  $I$  est relié à la densité d'hydrogène.

Typiquement, les dimensions des images sont de l'ordre de  $256 \times 256 \times (100 \text{ à } 200)$  pour les images IRM, ce qui correspond à une résolution de l'ordre du millimètre et de  $512 \times 512 \times (200 \text{ à } 1000)$  pour les images par scanographie X médicale ce qui permet de voir des détails jusqu'à 0,1 mm. Dans le cas du synchrotron, on peut atteindre  $2048 \times 2048 \times (100 \text{ à } 1000)$  pour une résolution atteignant quelques microns, ce qui correspond une quantité gigantesque de données informatiques (plusieurs giga-octets !).

Un point fondamental est que toutes ces images sont véritablement tridimensionnelles, c'est-à-dire qu'on peut voir et analyser les structures à l'intérieur même de l'échantillon contrairement aux dispositifs d'acquisition tridimensionnelle surfacique à base de laser ou de caméras (Lyons et coll., 2000).

Il reste maintenant à exploiter ces données, c'est-à-dire extraire dans l'image 3D la structure anatomique qui nous intéresse (en général sous la forme d'un maillage 3D de la surface) puis, prendre des mesures, si possible tridimensionnelles, afin de pouvoir établir des comparaisons. Or, les données sont très complexes à appréhender car elles peuvent être énormes et surtout, elles sont en trois dimensions, donc difficiles à afficher sur un écran et surtout à manipuler avec une simple souris. C'est pour cela qu'il nous semble indispensable d'utiliser des algorithmes automatiques qui assisteront le paléanthropologue dans ses recherches afin de le décharger de tâches fastidieuses pour qu'il puisse se consacrer pleinement à l'analyse-même du fossile. Mais le problème est que ces algorithmes sont eux-mêmes des sujets de recherche de pointe... en informatique.

Dans cet article, nous nous proposons de faire un point sur les travaux actuels de recherche en informatique et plus particulièrement en traitement automatique d'images 3D qui pourraient être appliqués à la paléo-anthropologie. Dans un premier temps, nous ne nous focaliserons que sur la définition de repères 3D qui est un des problèmes clefs pour l'étude morphométrique des fossiles.

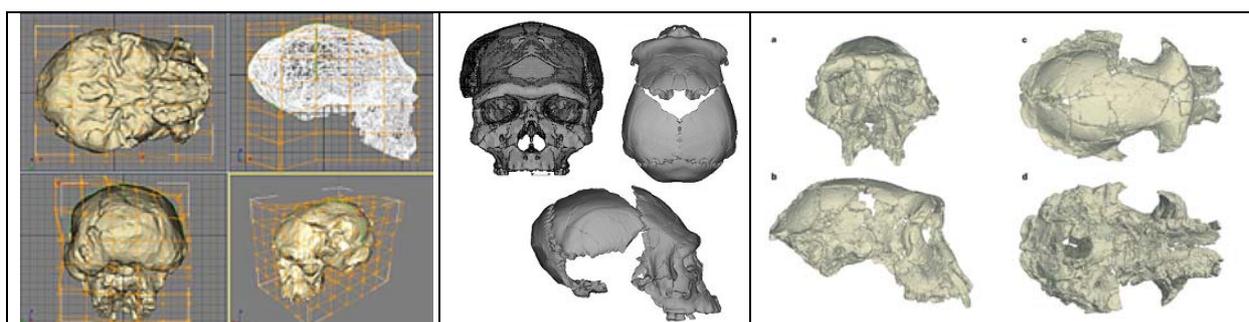


Figure 1 : quelques maillages 3D extraits d'images de crânes fossiles obtenus par scanographie X : Yunxian II (Violet et coll., 2005), Tautavel (Guipert et coll., 2003) et Toumaï (Zollikofer et coll., 2005).

## 2. Les différents types de repère 3D et la difficulté de leur définition

Les repères (ou landmarks) utilisés dans les analyses morphométriques tridimensionnelles sont habituellement classés en trois types définis dans (Bookstein, 1991). Dans ce chapitre, nous allons voir quels sont les types de repères qu'il est envisageable de détecter et de localiser avec une assistance informatisée.

### 2.1. Type 1 : définition anatomique

Les repères de type I ont une définition anatomique ou histologique précise, par exemple, une intersection de sutures. Pour autant, ils peuvent être très difficiles à localiser précisément, du fait de leur définition qui reste très qualitative mais surtout de la forte variabilité interindividuelle. Par exemple, le bregma, qui représente l'intersection des sutures coronale et sagittale du crâne (voir la figure 2) est utilisé pour déterminer le milieu de la calotte crânienne alors qu'en réalité, il n'est pas toujours situé sur la ligne mi-sagittale (Howells, 1973). De surcroît, la position de ce point doit être extrapolée pour être placée dans la continuité de la surface du crâne alors qu'il repose en fait dans un creux, au croisement des « canaux » des sutures. De même, la position géométrique de l'asterion, pourtant défini comme le point de jonctions de trois sutures peut varier tellement d'un individu à l'autre que certains chirurgiens mettent en garde contre son utilisation comme point de repère pour des opérations (Ucerler & Govsa, 2006). En fait, si ces repères pointent une structure « biologique » bien identifiée, ils peuvent avoir des positions géométriques très différentes relativement aux autres structures anatomiques.

Le nombre des repères de type I est très limité. Ainsi, sur le crâne, on ne peut définir que quelques dizaines de points qui ne sont pas du tout répartis uniformément, ce qui ne permet pas de mener des analyses morphométriques 3D de manière précise, sur toute la structure.

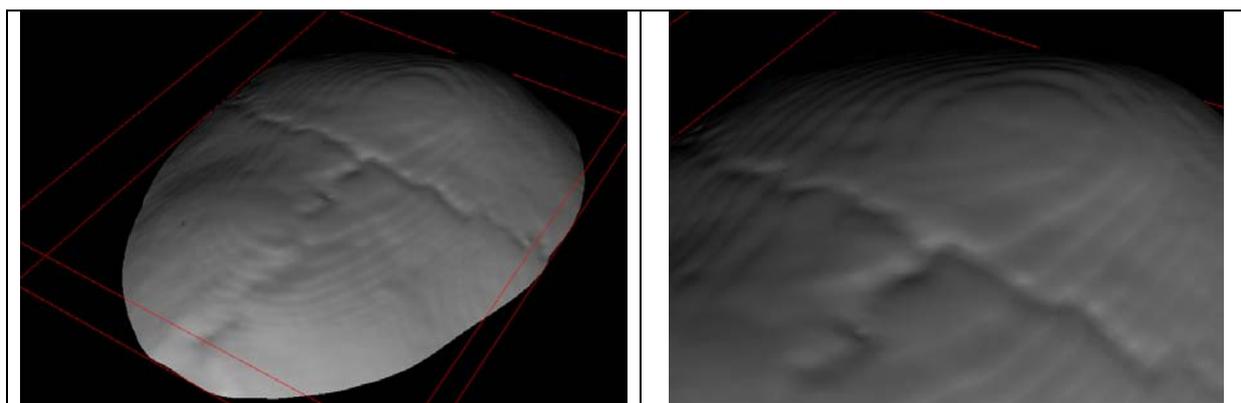


Figure 2 : difficulté de la localisation du bregma sur un maillage 3D extrait d'une image 3D

### 2.2. Type II : définition géométrique

Les repères de type II sont définis à partir de critères purement géométriques. Par exemple, les endroits de forte courbure sur la surface définissent des points ou des lignes saillants qui vont être des repères 3D particulièrement pertinents et facilement identifiables. En fait, on s'aperçoit que beaucoup de repères de type I ont indirectement une définition de type II. Par exemple, le bregma peut aussi être défini géométriquement comme le « fond » de la cuvette formée par l'intersection de deux « canaux » sur le dessus du crâne.

L'avantage des repères de type II est que leur définition ne dépend que de critères géométriques intuitifs, ce qui rend leur localisation accessible à des personnes non-expertes en anatomie. Par contre, on perd la notion d'« homologie », c'est-à-dire l'identification intrinsèque des repères.

### 2.3. Type III : définition « floue »

Les repères de type III (aussi appelés semi-landmarks) ont une définition que l'on peut qualifier de plus « floue », le terme « fuzzy » étant d'ailleurs utilisé dans (Valeri et coll., 1998). En effet, la définition fait intervenir la notion de coordonnée « déficiente » ; autrement dit, il s'agit de repères qui gardent un ou plusieurs degré de liberté. Par exemple, si on définit une ligne ou un quadrangle surfacique en localisant 2 ou 4 points de repère de type I ou II, on peut créer un point de repère de

type III qui glissera le long d'une ligne (1 degré de liberté) ou d'une surface (2 degrés de liberté). Ainsi, ce type de définition, en apparence assez vague, permet de définir des repères sous la forme de portions de ligne ou de surface.

Nous voyons que les repères de type III sont assez difficiles à formaliser car leur définition nécessite la localisation préalable d'autres repères de type I ou II.

#### *2.4. Discussion*

Actuellement, la grande majorité des paléanthropologues utilisent des repères ponctuels de type I ou II. Ceux-ci sont localisés soit directement dans l'image 3D, soit par pointage sur la surface de la structure anatomique qui a été extraite à partir de l'image. Beaucoup de logiciels commerciaux permettent de telles manipulations comme par exemple 3DViewnix<sup>1</sup>, Mimics<sup>2</sup> ou Amira<sup>3</sup> qui sont couramment utilisés par la communauté des paléanthropologues.

Certains paléanthropologues ont proposé d'utiliser des repères non-ponctuels comme des lignes ou des portions de surface. Pour les lignes, nous pouvons citer en particulier les travaux présentés dans (Dean, 1993) qui reprennent des concepts introduits dans (Bookstein & Cutting, 1988). Des lignes de repère sont extraites sur plusieurs fossiles afin de procéder à une analyse morphométrique pour étudier la transition entre deux lignées d'hominidés. Les résultats n'ont pas été obtenus à partir de véritables images 3D mais de numérisations 3D surfaciques de moulages à l'aide d'un capteur de position. L'auteur a continué ses recherches en utilisant cette fois des images tomodensitométriques X et a présenté des résultats très intéressants dans (Cutting et coll., 1995) et (Dean et coll., 1998). Dans cet article, un anatomiste pointe certains points caractéristiques de type I ou II et un modèle 3D composé de lignes s'ajuste à la surface du crâne. Il devient alors possible de définir des repères de type III et de les utiliser pour définir un modèle moyen. Cependant, cette méthode n'a été utilisée que pour des applications médicales et non pas paléanthropologiques. L'analyse morphométrique par des repères linéaires a été reprise dans (Marcus et coll., 1999) pour étudier des crânes fossiles de cercopithèques mais l'étude est restée incomplète.

Plus généralement, (Cutting et coll., 1993) propose d'utiliser intensivement les repères surfaciques de type III pour pouvoir modéliser plus précisément les déformations tridimensionnelles. Cette idée a été reprise très récemment dans (Gunz, 2005). Dans ces derniers travaux, plus de 400 repères sont placés sur des crânes fossiles : 37 sont des repères anatomiques de type I, 162 sont des repères de type III sur des lignes 3D et 236 sont des repères de type III sur des surfaces.

Il faut aussi noter les résultats récents et spectaculaires présentés dans (Wiley et coll., 2005). Les auteurs utilisent un logiciel pour placer aisément des points de repère sur la surface tridimensionnelle de la structure étudiée (voir la figure 3). Afin d'améliorer la précision de la localisation, il est possible d'afficher la normale en ce point, ce qui permet par exemple de bien appréhender la forme locale de la surface, en particulier près des zones de forte courbure. Il est aussi possible de définir des courbes ou des morceaux de surface en ne pointant que quelques points (dit de contrôle). Le logiciel interpole alors automatiquement un certain nombre de repères de type III le long de la courbe ou sur la portion de surface. Ce logiciel a été intensivement utilisé par des primatologues pour définir des repères sur près de 80 modèles 3D de crânes de primates. A noter que ce logiciel est téléchargeable gratuitement (Landmark)

---

<sup>1</sup> <http://mipgsun.mipg.upenn.edu/~Vnews/>

<sup>2</sup> <http://www.materialise.com/>

<sup>3</sup> <http://www.tgs.com/products/amira.asp>

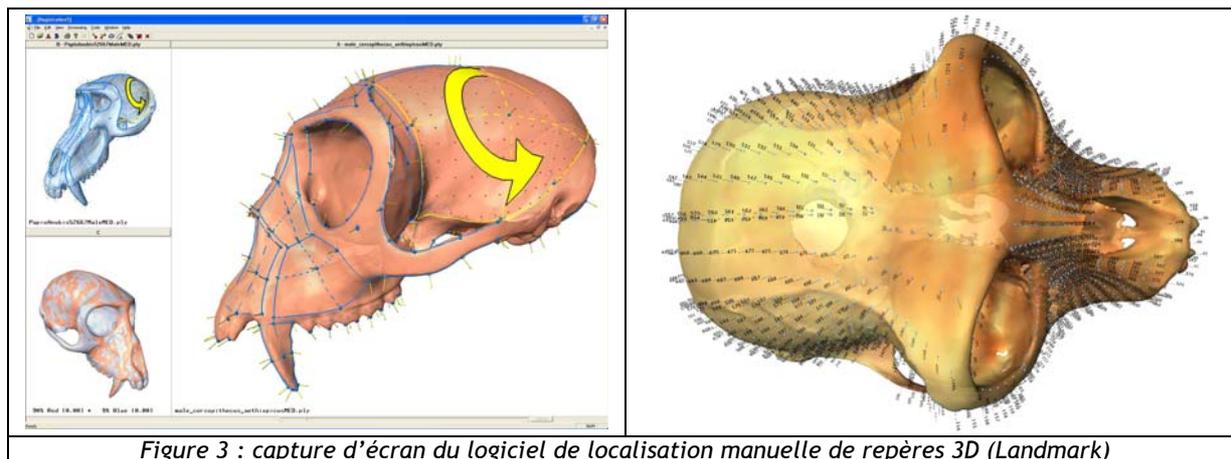


Figure 3 : capture d'écran du logiciel de localisation manuelle de repères 3D (Landmark)

### 3. Comment définir des repères 3D automatiquement ?

Dans ce chapitre, nous allons voir quels sont les différentes méthodes algorithmiques qui ont été proposées pour définir automatiquement des repères 3D.

#### 3.1. Les repères 3D ponctuels

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux repères ponctuels qui peuvent être détectés soit directement dans l'image 3D initiale, soit sur une surface préalablement extraite dans l'image.

Ces méthodes sont en général fondées sur la détection des points saillants d'une surface. Une première classe d'algorithmes généralise la détection de points « coin » qui est un problème classique en traitement d'images bidimensionnelles. La seconde classe utilise des formules mathématiques issues de la géométrie différentielle des surfaces, à savoir les valeurs des courbures, qu'elles soient principales, Gaussienne ou moyenne (voir la figure 4). Un exemple intéressant est donné dans (Thirion, 1996a) où des points dits « extrémaux » sont détectés et utilisés pour du recalage entre différentes images médicales 3D. La méthode permet de trouver de très nombreux points de repère 3D mais certains sont « aberrants » et il n'est pas facile de distinguer ceux qui sont vraiment significatifs et utiles.

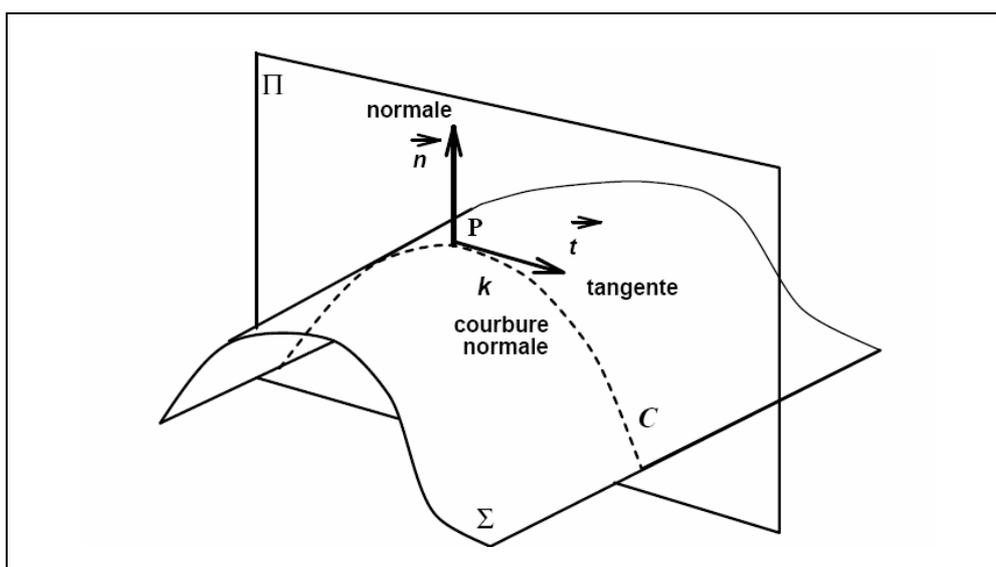


Figure 4 : paramètres différentiels d'une surface.

Prenons un point  $P$  sur une surface. On peut alors définir la normale  $\vec{n}$  en  $P$  : il s'agit de

*l'axe passant par P et qui est perpendiculaire localement à la surface. On peut alors faire tourner un plan autour de cet axe et on peut repérer sa direction par un angle  $\theta$  compris entre 0 et 360°.*

*Pour chaque direction  $\theta$ , on peut définir une courbe plane qui est l'intersection du plan et de la surface. Cette-courbe passe bien évidemment par P. On peut alors définir la courbure normale  $k(\theta)$  en P qui est l'inverse du rayon du cercle qui s'ajuste « au mieux » à la courbe dans le voisinage de P.*

*On démontre alors mathématiquement que la valeur de  $k(\theta)$  atteint un maximum et un minimum suivant deux angles décalés de 90°, autrement dit suivant deux directions qui sont perpendiculaires.*

*Les valeurs de ces courbures extrémales sont appelées courbures principales de la surface en P et les directions associées sont dénommées directions principales. On définit alors la courbure gaussienne et moyenne, respectivement comme le produit et la somme des deux courbures principales.*

On trouve une comparaison de nombreuses méthodes appliquées à des images scanographiques de la tête dans (Hartkens et coll., 2002) mais les repères choisis dans cette étude ne sont qu'au nombre de deux (le sommet de la protubérance externe occipitale et le point selle de l'os zygomatique) ce qui limite les conclusions à en tirer.

Plus récemment, (Wörz & Rohr, 2006) ont proposé de définir des modèles continus de l'intensité dans un petit bloc d'image 3D qui correspondent à certaines conformations géométriques particulières comme des pointes, des selles ou des sphères. Ces modèles sont alors « plongés » dans l'image 3D et s'ajustent automatiquement au mieux aux endroits correspondant à leur conformation-cible. Les résultats semblent prometteurs mais restent encore très limités. En particulier, il reste à améliorer la vitesse du processus d'optimisation et à minimiser l'influence de l'initialisation. Enfin, il faudrait effectuer des tests sur des images de fossiles, qui peuvent être de qualité variable.

### *3.2. Les repères 3D linéaires*

La localisation des repères ponctuels n'est pas toujours très fiable. Par exemple, dans le cas d'une bosse aplatie, la courbure maximale va très peu varier autour du sommet et du fait de la discrétisation de l'image, on va calculer un point extrémal qui risque d'être décalé par rapport au sommet théorique. Aussi une idée est d'utiliser des repères linéaires, c'est-à-dire une suite de nombreux points (quelques dizaines à quelques centaines) reliés entre eux de manière « cohérente ». Dans ce cas, même si quelques points sont instables, voire ne sont pas détectés, on peut espérer obtenir une ligne significative. De surcroît, l'utilisation de repères linéaires est assez intuitive tant d'un point de vue géométrique (avec par exemple, le concept de ligne saillante) qu'anatomique (par exemple, la ligne sous-mandibulaire).

L'extraction automatique de repères linéaires dans des images 3D a été intensivement étudiée dans (Thirion, 1996b). Les points composant ces « lignes de crête » sont définis comme des extrema des courbures principales suivant la direction principale associée. L'algorithme détecte les éventuelles lignes « parasites » en utilisant des critères sur la longueur ou sur leur persistance quand on discrétise l'image à des échelles inférieures. Des résultats sur la comparaison morphométrique entre un Homme Moderne et l'Homme de Tautavel, ont été présentés dans (Subsol et coll., 2002). Même si ces derniers restent préliminaires, cela montre que la méthode peut être appliquée en paléo-anthropologie.

D'autres travaux ont proposé des définitions différentes. Celles-ci peuvent se fonder sur la géométrie différentielle mais en y intégrant une analyse topologique (Cazals et coll., 2006), sur la détection des singularités des surfaces focales (Yoshizawa et coll., 2005) ou sur la notion de Medial Axis Transform (Yoshizawa et coll., 2005). Mais on ne trouve pratiquement pas de résultats sur des structures osseuses qui pourraient être généralisés à l'analyse des fossiles. En fait, ces travaux sont appliqués soit sur des objets manufacturés pour essayer de retrouver les modèles CAO<sup>4</sup> soit sur les visages pour en souligner les traits caractéristiques, soit sur le cortex cérébral pour suivre les sillons corticaux (Subsol et coll., 1998).

---

<sup>4</sup> Conception Assistée par Ordinateur

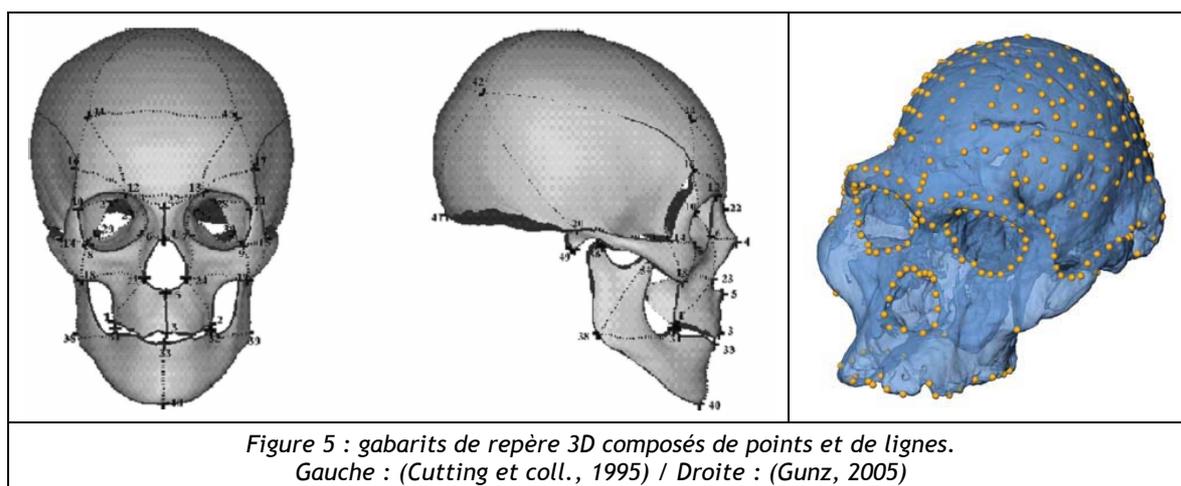
Notons qu'il existe des logiciels en accès libre pour calculer des repères 3D linéaires sur des maillages 3D comme par exemple (Crest).

### 3.3. Les gabarits de repères 3D

Cependant, les repères 3D ponctuels ou linéaires restent difficiles à calculer. Aussi, une idée est de prendre en compte l'expertise en anatomie ou en paléo-anthropologie pour construire un gabarit tridimensionnel de repères. Ce gabarit normalisé est alors ajusté à l'image du fossile afin de définir les repères 3D propres à l'échantillon étudié. Cette approche est similaire à l'utilisation d'un atlas médical qui est « plaqué » sur la structure anatomique d'un patient (Christensen et coll., 1996).

Une première utilisation d'un gabarit du crâne construit à partir de repères 3D ponctuels et linéaires se trouve dans (Cutting et coll., 1993) et est détaillée dans (Cutting et coll., 1995). Ce gabarit comporte 50 repères ponctuels anatomiques reliés par des lignes de type « ridge curves » ou géodésiques (voir figure 5, à gauche). Ces dernières sont définies par 149 repères ponctuels de type III.

Plus récemment (Gunz, 2005) a proposé un gabarit pour une analyse de spécimens australopithèques. Le gabarit est composé de 37 repères 3D ponctuels anatomiques et des repères ponctuels de type III répartis sur des « ridge curves » (162 points) et plus généralement sur la surface (236 points).



Cette approche est très séduisante car elle permet de formaliser l'expertise humaine. Cependant, il subsiste une grosse difficulté : en effet, il faut déformer le gabarit pour l'ajuster au fossile étudié alors que les différences morphologiques peuvent être extrêmement importantes. Pour cela, dans (Cutting et coll., 1993) et (Gunz, 2005), l'utilisateur identifie manuellement un certain nombre de repères ponctuels sur le fossile et les points correspondants du gabarit vont s'aligner sur ces derniers. Le reste du gabarit va alors subir une déformation tridimensionnelle qui est extrapolée à partir de ces couples de points appariés. Cette déformation est du type Thin Plate Spline qui est très utilisé en morphométrie. Enfin, une dernière étape « plaque » ou ajuste finement le gabarit sur la surface du fossile.

Pour résoudre ce problème de mise en correspondance de points (ou de « recalage ») entre deux structures (dans notre cas, le gabarit et l'image ou la surface 3D), il existe de nombreuses méthodes automatiques qu'on peut séparer en deux catégories.

La première d'entre elles recherche un certain nombre d'amers dans les structures. Ces amers sont d'ailleurs souvent du même type que les repères ponctuels ou linéaires décrits plus haut. Un algorithme apparie alors ces amers de la manière la plus « cohérente » possible en utilisant leurs caractéristiques (par exemple les amers qui sont localisés sur des zones concaves du premier échantillon ne peuvent être appariés que sur des amers positionnés sur des zones similaires dans le deuxième échantillon) ou leurs distances (les amers proches vont avoir plus de chance d'être

appariés si on suppose que les deux objets ont été préalablement grossièrement alignés). Il devient alors possible de calculer une déformation tridimensionnelle qui superpose « au mieux » les amers appariés (c'est-à-dire qui minimise la somme des distances entre les amers une fois la transformation appliquée), ce qui permet de d'ajuster le gabarit sur la structure étudiée.

La seconde classe de méthode essaie de trouver un champ de déformation dense en tout point. Pour cela, une idée est de prendre un point  $P_1(x,y,z)$  dans la première structure et de rechercher dans le voisinage du point qui a les mêmes coordonnées sur la seconde structure le point  $P_2(x',y',z')$  qui lui « ressemble » (ou « corrèle » en termes mathématiques) le plus, que ce soit en termes géométriques (courbure similaire par exemple) ou photométriques (intensité proche). On définit alors un vecteur local de déformation  $d(P_1)=P_1P_2$  au point  $P_1$ . Une fois qu'on a ce vecteur en tout point, on peut éliminer les vecteurs aberrants et lisser le champ de vecteurs  $d(P)$  en fonction de critères de régularité mathématique. A la fin, il suffit d'appliquer en tout point de la première structure, le vecteur de déplacement pour trouver le point correspondant sur la deuxième structure.

Il y a une dizaine d'années, ces algorithmes de recalage dits « déformables » nécessitaient des heures de calcul et parfois du matériel informatique spécialisé. Grâce à l'accélération des processeurs, l'augmentation de la mémoire et l'optimisation des méthodes, il est tout à fait envisageable d'obtenir aujourd'hui une transformation 3D en quelques minutes sur un ordinateur standard. On peut trouver une présentation synthétique des différentes méthodes dans (Audette et coll., 2000) ou (Maintz & Viergever, 1998) même si ces articles sont un peu anciens.

Ceci dit, la méthode du gabarit a une limite. Elle suppose que le gabarit représente « raisonnablement » la structure cible, autrement dit que la déformation 3D pour plaquer le gabarit sur l'échantillon est relativement continue et régulière. Or, cette hypothèse n'est pas valable dans le cas de fossiles qui sont, en général, des structures anatomiques incomplètes. Par exemple, il va être difficile d'adapter un gabarit de crâne complet comme ceux présentés dans la figure 5 sur un fossile où il manque le pariétal. Pour pallier cette difficulté, il faut procéder d'abord à la « reconstruction » du fossile, au sens paléontologique du terme (Gunz, 2005, chapitre 5). A noter que ce problème apparaît aussi quand on veut ajuster un gabarit de crâne d'adulte sur un d'enfant. Dans ce dernier cas, les fontanelles sont ouvertes et il est alors difficile d'y adapter la surface du gabarit qui est, elle, sans trou. Il peut y avoir un ajustement visuellement correct mais qui n'aura pourtant aucune signification anatomique autour des sutures comme souligné dans (Christensen et coll., 1996).

## 4. Perspectives

Dans ce chapitre, nous proposons deux pistes de recherche en informatique qui nous semblent les mieux adaptées pour pouvoir utiliser des algorithmes performants de définition de repères 3D dans le cadre d'une étude paléo-anthropologique.

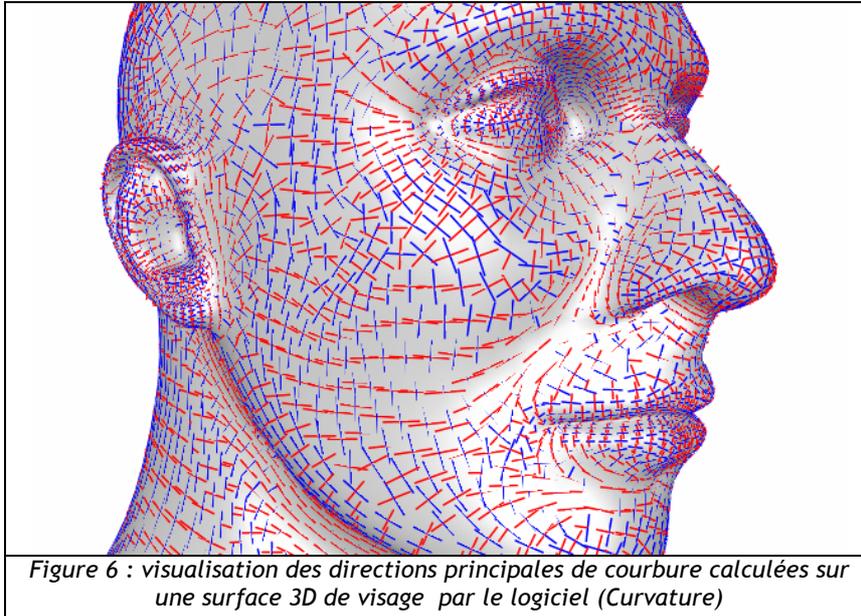
### 4.1. Développement des méthodes fondées sur la géométrie différentielle

Ces dernières années, de nouveaux algorithmes ont été proposés pour calculer les paramètres différentiels d'une surface. Les applications ne se limitent d'ailleurs pas à la définition de repères 3D mais plus généralement à la caractérisation locale de la forme de la surface, par exemple à des fins de remaillage (Alliez et coll., 2003) ou d'identification et de recalage (Gal & Cohen-Or, 2006). Nous pouvons classer les algorithmes en deux catégories.

Dans la première, on utilise seulement les informations du maillage qui compose la surface 3D, à savoir les positions des points et la disposition des arêtes qui les relie. En particulier, (Cohen-Steiner & Morvan, 2003) propose une méthode utilisant la théorie dite du « cycle normal » qui fournit une estimation de l'erreur de calcul en fonction de certaines hypothèses sur la discrétisation. Les auteurs mettent d'ailleurs à disposition des Internautes un programme de démonstration (Curvature).

La seconde catégorie d'algorithmes propose d'ajuster localement « au mieux » une fonction mathématique sur le nuage de points qui forme la surface 3D. Il devient alors possible de calculer

analytiquement les paramètres différentiels. Une des méthodes les plus récentes a été proposée par (Cazals & Pouget, 2007) et utilise des fonctions polynomiales d'approximation. Là aussi, les auteurs proposent un logiciel de démonstration (Jet\_fitting\_3).



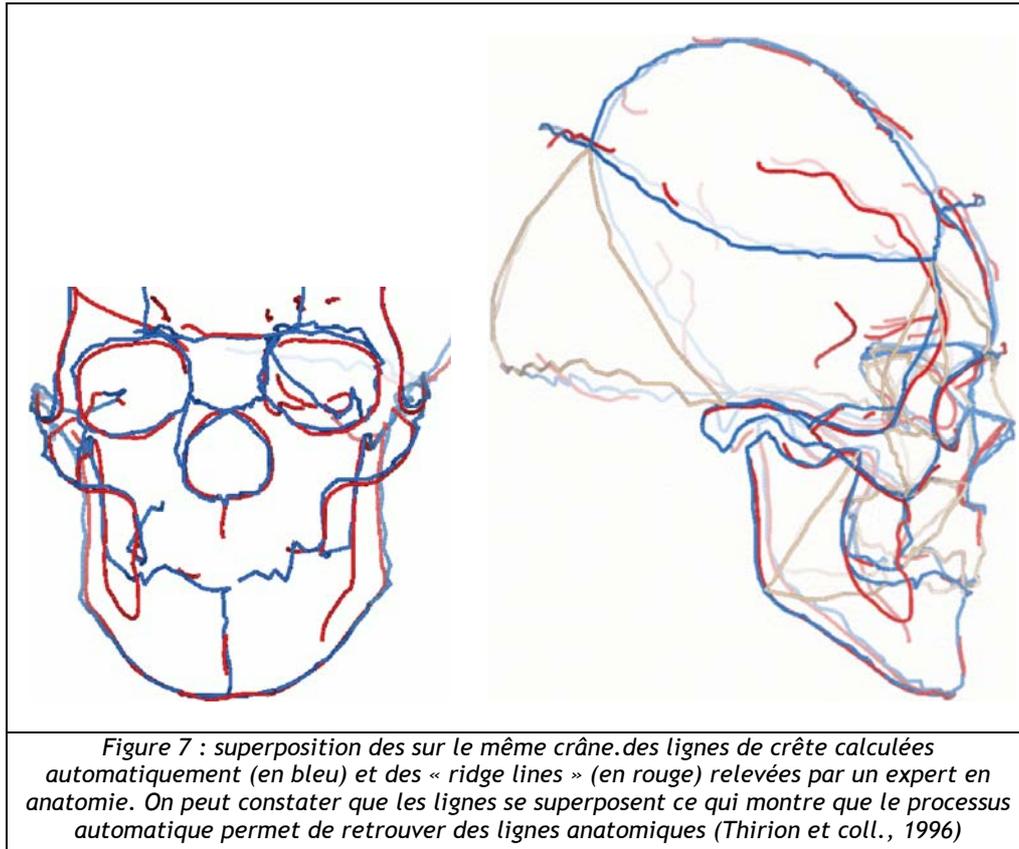
Dans les deux cas, le problème majeur reste la sensibilité des paramètres calculés par rapport aux petites perturbations de la surface qui proviennent soit des erreurs de numérisation et de reconstruction soit des approximations dues à la discrétisation de la surface par un nombre limité de points. Par exemple, près des endroits où la surface est sphérique ou plane (ces points sont appelés ombilics), les directions principales de courbure ne vont pas être significatives si le maillage de la surface n'est pas assez dense. Bien entendu, si les paramètres différentiels calculés sont trop imprécis ou incohérents, il deviendra impossible de calculer des repères 3D qu'ils soient ponctuels ou linéaires. Les algorithmes proposés intègrent donc tous une régularisation de la surface soit en prenant en compte dans les calculs un voisinage du point considéré assez important pour « lisser » les perturbations, soit en utilisant des fonctions mathématiques qui sont régulières par construction. Cependant, il peut arriver qu'on détruise ainsi des petits détails anatomiques comme des sutures peu profondes qui pourraient s'avérer importants dans le cadre d'une étude paléo-anthropologique.

#### 4.2. Comparaison des résultats manuels et automatiques

Quelle que soit la méthode utilisée, il est important de comparer les repères calculés automatiquement et les repères utilisés couramment par les paléo-anthropologues. Bien entendu, cette comparaison ne va pas être facile car les repères ne sont pas identiques et donc superposables. En effet, les paléo-anthropologues utilisent de préférence les repères de type I alors que nous avons vu que les algorithmes n'étaient vraiment efficaces que pour ceux de type II.

On trouve beaucoup d'études, par exemple (Williams & Richtsmeier, 2003) ou (Badawi-Fayad & Cabanis, 2007), qui comparent la différence de localisation d'un repère sur un échantillon réel et dans le modèle 3D afin d'évaluer l'erreur due au processus de numérisation ou à la complexité de repérage d'un point sur un écran. De même, de nombreuses recherches ont été menées pour quantifier la variabilité de la localisation manuelle d'un repère 3D, qu'elle soit intra ou inter-utilisateurs. Dans ce dernier cas, on trouve bien entendu des valeurs importantes pour les repères de type III (Valeri et coll., 1998).

Mais il y a très peu de travaux sur la comparaison entre localisation automatique et manuelle de repères 3D, qu'ils soient ponctuels ou linéaires. Un rare exemple semble être celui décrit dans (Thirion et coll., 1996). Dans cet article, les auteurs montrent que les écarts entre les points des lignes de crête calculées automatiquement et les « ridge lines » relevées par un expert en anatomie atteignent seulement quelques millimètres dans une image 3D du crâne.



Il resterait à prolonger ces expériences sur de nombreux échantillons fossiles et sur d'autres structures anatomiques pour valider une procédure de définition automatique de repères 3D.

#### *4.3. Conclusion*

Il nous semble clair que face à l'accroissement des données 3D (que ce soit en nombre d'acquisitions ou en résolution des images), il devient indispensable d'utiliser des outils automatiques pour détecter des repères 3D. Ceci permettra de mener des analyses paléo-anthropologiques avec plus de précision et sur un plus grand nombre d'échantillons.

Nous pensons que les repères fondés sur des paramètres différentiels sont bien adaptés. Nous avons vu que certaines méthodes automatiques très efficaces ont été proposées pour un calcul de ces paramètres et que des logiciels issus de la Recherche la plus récente sont déjà disponibles en accès libre. Cependant, il reste encore à formaliser les définitions des repères à partir de ces paramètres. Les repères linéaires (du genre ligne saillante) sont certainement à considérer car ils permettent de mieux appréhender visuellement la forme d'une surface qu'un ensemble de points épars.

Mais il faut encore valider la précision de la localisation de ces repères et leur pertinence en termes d'application paléo-anthropologique. Et c'est à ce niveau-là qu'une collaboration proche entre informaticiens et paléo-anthropologues est absolument indispensable pour faire avancer les connaissances.

*Les idées présentées dans cet article proviennent de recherches et de discussions effectuées, en particulier, avec les personnes suivantes que nous remercions vivement : Nicholas Ayache, Hervé Delingette, Gaspard Guipert, Jean-Pierre Jessel, Henry de Lumley, Bertrand Mafart, Denis Méline, Gérald Quatrehomme et Jean-Philippe Thirion.*

Ces travaux sont soutenus par le Département Sciences et Technologies de l'information et de l'Ingénierie du CNRS à travers le Projet Exploratoire Pluridisciplinaire ODENT (Outils d'Exploration et de Navigation Tridimensionnels pour l'Archéologie et la Paléontologie).

## Bibliographie

- Alliez P., David Cohen-Steiner D., Devillers O., Levy B., Desbrun M., 2003, Anisotropic Polygonal Remeshing in *ACM Transactions on Graphics*, Special Issue for SIGGRAPH Conference, p. 485-493.
- Audette M.A., Ferrie F.P., Peters T.M., 2000, An Algorithmic Overview of Surface Registration Techniques for Medical Imaging, in *Medical Image Analysis*, 4, 201-217.
- Badawi-Fayad J., Yazbeck C., Balzeau A., Nguyen T.H., Istoc A., Grimaud-Hervé D., Cabanis E.A., 2005, Multi-detector row CT scanning in Paleoanthropology at various tube current settings and scanning mode, in *Surgical and Radiologic Anatomy*, 27, p. 536-543.
- Badawi-Fayad J., Cabanis E.A., 2007, Three-dimensional Procrustes analysis of modern human craniofacial form, in *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology*, Vol. 290, Issue 3, p. 268-276.
- Bookstein F.L., 1991, *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge University Press.
- Bookstein F.L., Cutting C.B., 1988, A proposal for the apprehension of curving craniofacial form in three dimensions, in Vig K., Burdi A. (eds) *Craniofacial Morphogenesis and Dymorphogenesis*. Ann Arbor, MI: Center for Human Growth and Development.
- Cazals F., Pouget M., 2005, Estimating differential quantities using polynomial fitting of osculating jets, in *Computer Aided Geometric Design*, 22(2), p. 121-146.
- Cazals F., Faugère J.C., Pouget M., Rouillier F., 2006, The implicit structure of ridges of a smooth parametric surface, in *Computer Aided Geometric Design*, 23, p. 582-598.
- Christensen G.E., Kane A.A., Marsh J.L., Vannier M.W., 1996, Synthesis of an Individualized Cranial Atlas with Dymorphic Shape, in *IEEE Proceedings of Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis*, p. 309-318.
- Clark N.D.L., Adams C., Lawton T., Cruickshank A.R.I., Woods K., 2004, The Elgin marvel: using magnetic resonance imaging to look at a mouldic fossil from the Permian of Elgin, Scotland, UK, in *Magnetic Resonance Imaging*, 22, p. 269-273.
- Cohen-Steiner D., Morvan J.M., 2003, Restricted Delaunay triangulations and normal cycle, in *Proceedings of the 19<sup>th</sup> Annual ACM Symposium on Computational Geometry*, p. 237-246.
- Crest : logiciel de détection de lignes de crête écrit en C++ et Java 3D : <http://www.mpi-inf.mpg.de/~shin/Research/Crest/Crest.html>
- Curvature : logiciel d'estimation des tenseurs de courbure sur des maillages 3D : <http://www-sop.inria.fr/geometrica/team/Pierre.Alliez/demos/curvature/>
- Cutting C.B., 1991, Applications of computer graphics to the evaluation and treatment of major craniofacial malformations, in Udupa J.K., Herman G.T. (eds). *3D Imaging in Medicine*, chap. 6, p 163-189, CRC Press.
- Cutting C.B., Bookstein F.L., Haddad B., Dean D., Kim D., 1993, A spline-based approach for averaging three-dimensional curves and surfaces, in actes de la conférence *Mathematical Methods in Medical Imaging II*, SPIE Vol. 2035, p. 29-41.

- Cutting C.B., Dean D., Bookstein F.L., Haddad B., Khorramabadi D., Zonneveld F., McCarthy J.G., 1995, A Three-Dimensional Smooth Surface Analysis of Untreated Crouzon's Syndrome in the Adult, in *Journal of Craniofacial Surgery*, 6:6, p. 444-453.
- Dean D., 1993, *The Middle Pleistocene Homo Erectus/Homo Sapiens Transition: New Evidence from Space Curve Statistics*, Ph.D. Thesis, The City University of New York.
- Dean D., Bookstein F.L., Koneru S., Lee J.H., Kamath J., Cutting C.B., Hans M., Goldberg J., 1998, Average African American three-dimensional computed tomography skull images: the potential clinical importance of ethnicity and sex., in *Journal of Craniofacial Surgery*, 9(4), p. 348-358.
- Gal R., Cohen-Or D., 2006, Salient geometric features for partial shape matching and similarity, in *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 25, No. 1, p. 130-150.
- Guipert G., Subsol G., Jessel J.P., Delingette H., Mafart B., 2003, The FOVEA Project: a New Look at Human Past, in *9<sup>th</sup> International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, Montreal (Canada).
- Gunz P., 2005, *Statistical & Geometric Reconstruction of Hominid Crania - Reconstructing Australopithecine Ontogeny*, Ph.D. Thesis, University of Wien (Autriche).
- Hartkens T., Rohr K., Stiehl H.S., 2002, Evaluation of 3D Operators for the Detection of Anatomical Point Landmarks in MR and CT Images, in *Computer Vision and Image Understanding*, 86, p.118-136.
- Howells W.W., 1973, Cranial Variation in Man: A Study by Multivariate Analysis of Patterns of Difference among Recent Human Populations, in *Peabody Museum Papers*, Vol. 67.
- Jet\_fitting\_3 : logiciel d'estimation des paramètres différentiels sur une surface 3D : <http://www-sop.inria.fr/geometrica/team/Frederic.Cazals/software/index.html>
- Landmark : logiciel de localisation manuelle de repères 3D fonctionnant sous Windows : <http://graphics.idav.ucdavis.edu/research/EvoMorph>
- Lyons P.D., Rioux M., Patterson R.T., 2000, Application of a Three-Dimensional Color Laser Scanner to Paleontology: an Interactive Model of a Juvenile Tylosaurus sp. Basisphenoid-Basioccipital, in *Palaeontologia Electronica*, Vol. 3, Issue 2, <http://palaeo-electronica.org>
- Maintz J.B.A., Viergever M.A., 1998, A Survey of Medical Image Registration, in *Medical Image Analysis*, 2 (1), p. 1-36.
- Marcus L.F., Frost S.R., Bookstein F., Reddy D.P., Delson E., 1999, Comparison of landmarks among living and fossil Papio and Theropithecus skulls, with extension of Procrustes methods to ridge curves, article non-publié, trouvé sur Internet à une adresse Web qui n'est plus valide (<http://research.amnh.org/nycep/aapa99/aapa6.html>).
- Mazurier A., Volpato V., Macchiarelli R., 2006, Improved noninvasive microstructural analysis of fossil tissues by means of SR-microtomography, in *Applied Physics A*, A83, p. 229-233.
- Noel J., Subsol G., Mafart B., Guipert G., Gascuel J.D., 2005, Les collections muséographiques en 3D par microtomographie rayons X, in actes de la conférence *Virtual Retrospect*, Biarritz (France).
- Schwarz D., Vontobel P., Lehmann E.H., Meyer C.A., Bongartz G., 2005, Neutron Tomography of Internal Structures of vertebrate remains, in *Paleontologia Electronica*, Vol. 8, Issue 2, <http://palaeo-electronica.org>

- Steiger T., 2001, Nuclear magnetic resonance imaging in paleontology, in *Computers & Geosciences*, 27, p. 493-495.
- Subsol G., Mafart B., Silvestre A., de Lumley M.A., 2002, 3D Image Processing for the Study of the Evolution of the Shape of the Human Skull: Presentation of the Tools and Preliminary Results, in actes du *XIV<sup>th</sup> International Congress of Prehistoric and Protohistoric Science*, Liège (Belgique), texte complet dans Mafart B., Delingette H. avec la collaboration de Subsol G. (éds.) *Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology*, British Archaeological Reports International Series 1049, 37-45.
- Subsol G., 1998, Crest Lines for Curve Based Warping. A. Toga (éd.), in *Brain Warping*, chapter 14, 241-262, Academic Press.
- Tafforeau P., Boistel R., Boller E., Bravin A., Brunet M., Chaimanee Y., Cloetens P., Feist M., Hozzowska J., Jaeger J.J., Kay R.F., Lazzari V., Marivaux L., Nel A., Nemoz C., Thibault X., Vignaud P., Zabler S., 2006, Applications of X-ray synchrotron microtomography for non-destructive 3D studies of paleontological specimens, in *Applied Physics A*, p. 195-202.
- Tate J.R., Cann C.E., 1982, High-Resolution Computed Tomography for the Comparative Study of Fossil and Extant Bone, in *American Journal of Physical Anthropology*, 58:67-73.
- Thirion J.P., 1996a, New Feature Points based on Geometric Invariants for 3D Image Registration, in *International Journal of Computer Vision*, 18(2):121-137.
- Thirion J.P., 1996b The Extremal Mesh and the Understanding of 3D Surfaces, in *International Journal of Computer Vision*, 19(2):115-128.
- Thirion J.P., Subsol G., Dean D., 1996, Cross Validation of Three Inter-Patients Matching Methods, in K. H. Höhne et R. Kikinis (éds.), *Visualization in Biomedical Computing*, Lecture Notes in Computer Science 1131, p. 327-336, Hambourg (Allemagne), Springer.
- Ucerler H., Govsa F., 2006, Asterion as a surgical landmark for lateral cranial base approaches, in *Journal of Craniomaxillofacial Surgery*, 34-7, p. 415-420.
- Valeri C., Cole T.M., Lele S., Richtsmeier J.T., 1998, Capturing data from three-dimensional surfaces using fuzzy landmarks, in *American Journal of Physical Anthropology*, 107:(1), p. 113-124.
- Vialet A., Li T., Grimaud-Hervé D., de Lumley M.A., Liao M., Feng X., 2005, Proposition de reconstitution du deuxième crâne d'Homo Erectus de Yunxian (Chine), in *C.R. Académie des Sciences, Palevol*, 4, p. 265-274.
- Wiley D.F., Amenta N., Alcantara D.A., Ghosh D., Kil Y.J., Delson E., Harcourt-Smith W., Rohlf F.J., St. John K., Hamann B., 2005, Evolutionary Morphing, in *Proceedings of IEEE Visualization*, <http://graphics.idav.ucdavis.edu/research/EvoMorph>
- Williams F.L., Richtsmeier J.T., 2003, Comparison of Mandibular Landmarks from Computed Tomography and 3D Digitizer Data, in *Clinical Anatomy*, 16, p. 494-500.
- Wörz S., Rohr K., 2006, Localization of anatomical point landmarks in 3D medical images by fitting 3D parametric intensity models, in *Medical Image Analysis*, 10, p. 41-58.
- Yoshizawa S., Belyaev A.G., Seidel H.P., 2005, Fast and Robust Detection of Crest Lines on Meshes, in proceedings of *Technical Sketch: ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*, p. 227-232, MIT, Cambridge (E.U.), p. 13-15.
- Zollikofer C.P.E., Ponce de León M.C., Lieberman D.E., Guy F., Pilbeam D., Likius A., Mackaye H.T., Vignaud P., Brunet M., 2005, Virtual cranial reconstruction of Sahelanthropus tchadensis, in *Nature*, Vol. 434, p. 755-759.