

# Segmentation morphologique géodésique de surfaces. Application à la morphométrie interactive des surfaces articulaires en anthropologie

Jean-José JACQ<sup>1</sup>, Christian ROUX<sup>1</sup>, Christine COUTURE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LATIM (EA 2218), Dpt ITI, ENST Br  
ZI Pointe du Diable, BP 832, 29285 BrestCedex, France

<sup>2</sup>Laboratoire d'anthropologie (UMR 5809) - Université Bordeaux I  
Avenue des Facultés, 33405 Talence Cedex, France

JJ.Jacq@enst-bretagne.fr, Christian.Roux@enst-bretagne.fr  
C.Couture@anthropologie.u-bordeaux.fr

**Résumé** – Dans le cadre initial de l'étude du complexe articulaire péri-talien, nous proposons une méthode efficace et non paramétrique de partitionnement hiérarchique d'une forme 3D quelconque. L'idée centrale repose sur l'extension de la notion de bassins versants au cas des espaces courbes en s'appuyant sur une valuation locale déduite des courbures principales d'un support polyédral. Les résultats présentés portent sur l'extraction automatique des surfaces articulaires d'un talus fossile. En aval, est également proposée une technique robuste d'extraction automatique des caractéristiques géométriques des surfaces articulaires ainsi extraites. De par sa généralité, cette technique peut être étendue à d'autres types de données (ex. données bathymétriques).

**Abstract** – While firstly focusing on the study of the peri-talar joint, we propose an efficient and non-parametric hierarchical partitioning of a general 3D shape. The basic idea is to extend use of basin districts concept on curved spaces - such a partitioning process being applied on valuation issued from computation of main curvatures over a polyhedral support. The results described here address the automatic extraction of articular surfaces from a fossil bone (Talus). Moreover, ability to access a partition focusing on articular surfaces lead us to propose an automatic modelization issued from a robust estimator. Due to its generality, this method can also be applied to other data types (such as bathymetric data.).

## 1 Introduction

L'objectif de ce travail est de mettre à la disposition des experts anthropologues - et plus généralement des anatomistes - un outil efficace de morphométrie interactive combinant des algorithmes avancés de partitionnement de formes 3D avec les facilités offertes par les ressources infographiques standards. L'application envisagée porte sur l'étude des surfaces articulaires et constitue une approche alternative de celle décrite dans [1] et a fait l'objet d'une présentation préliminaire dans [2]. Les résultats illustrant ce document s'intègrent à l'étude du complexe articulaire péri-talien - le talus, le calcaneum, et les épiphyses distales du tibia et de la fibula - et reposent sur une banque d'échantillons issus de matériel fossile néandertalien et disponibles sous la forme d'images 3D en modalité CT (voir figure 1). L'objectif de l'anthropologue est d'inférer des caractéristiques cinématiques discriminantes de l'apparition de la bipédie à partir de l'étude morphométrique des structures osseuses et, en particulier, des surfaces articulaires. Le problème de la segmentation de l'image 3D n'est pas abordé. La surface décrivant la structure osseuse est supposée connue sous la forme d'une *tessellation irrégulière* ; dans le

cas des structures sèches ou fossiles, la simple extraction d'une iso-surface permet d'obtenir la description requise.

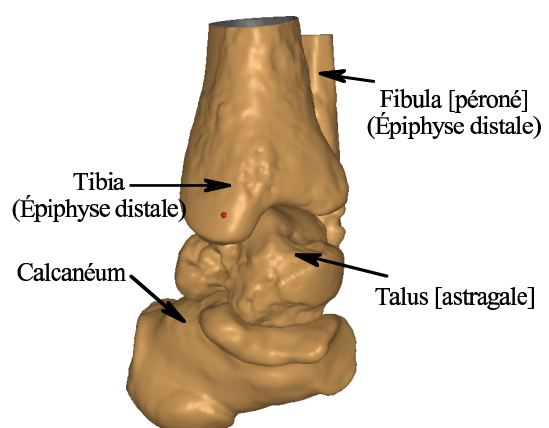


FIG. 1 : exemple d'une reconstitution préliminaire d'une articulation péri-talienne fossile gauche (La Ferrassie I)

## 2 Méthodologie

Le processus d'aide à l'extraction des surfaces articulaires doit tenir compte, au sein de la tessellation, de l'existence

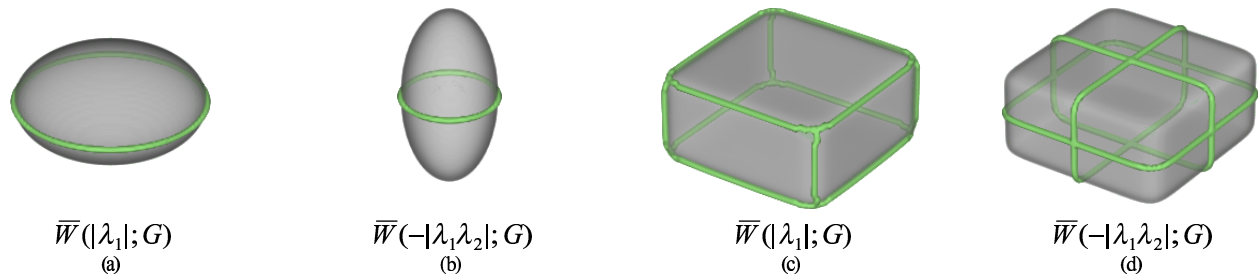


FIG. 2 : exemples de décomposition morphologique de formes simples

d'éventuels artefacts de segmentation ainsi que du degré d'altération des structures fossiles. La solution la plus souple est d'offrir à l'expert différents *modes* de *partitionnement hiérarchique* de la tessellation ; ce dernier peut ensuite déterminer interactivement le mode, ainsi que le niveau hiérarchique, du partitionnement le plus approprié à la représentation du sous-ensemble recherché. Dans le cadre d'une étude biomécanique, ce sous-ensemble représente des éléments d'une même surface articulaire ; sa modélisation constitue la seconde étape de l'analyse. Cette dernière vise l'extraction de *caractéristiques géométriques globales* telles que les axes principaux (ou le centre) de rotation ainsi que les rayons associés. La disponibilité opérationnelle d'un tel outil permettra d'entreprendre ultérieurement une étude portant sur plusieurs individus puis de réaliser une confrontation intra et inter articulaire des caractéristiques cinématiques des surfaces avec celles découlant des modèles existant ; celle-ci induira une meilleure compréhension du fonctionnement du complexe articulaire péri-talien, non seulement chez l'homme fossile, mais aussi chez l'homme moderne. L'outillage algorithmique requis par cette démarche expérimentale sous entend une très forte interactivité - *i.e.* la mise en oeuvre d'algorithmes *efficaces* - ainsi qu'une maîtrise intuitive des outils proposés - *i.e.* la minimisation du *nombre des paramètres* de contrôle.

### 3 Algorithme de partitionnement

La stratégie retenue en vue du partitionnement de la tessellation constitue une généralisation de l'algorithme de partitionnement d'un *graphe morphologique* en bassins versants [3] au cas du *support* associé à la tessellation d'une surface - le *graphe* correspondant sera noté  $G$ . Dans le cas usuel d'un support Euclidien, cette transformation globale réalise une partition des *sommets* du support en régions présentant un profil concave (bassins versants) au regard de la *valuation* scalaire affectée à chacun des sommets. Dans le contexte plus général de la segmentation par *propagation de fronts*, cette transformation se ramène au cas particulier de la progression simultanée de plusieurs fronts par *advection* selon une vitesse locale inversement proportionnelle au module du gradient de la valuation [4] ; la flèche du temps est directement assimilée au parcours uniforme par valeurs croissantes de la plage des élévations en présence ; un front prend naissance sur le pourtour intérieur d'un minimum régional à un instant  $t$  identifiable à la valuation de ce

minimum. Ceci se traduit, dans le cas particulier d'un relief, par une analogie avec un processus d'immersion à vitesse constante. En dehors de son caractère *global*, la caractéristique essentielle d'un partitionnement en bassins versants est d'être *intrinsèque* car elle ne requiert la définition d'*aucun* paramètres de contrôle. Par ailleurs, une généralisation des techniques mises en oeuvre dans [3] permet de l'implémenter efficacement sur le *graphe spatial irrégulier*  $G$  décrivant les surfaces considérées. Le mode de partitionnement dépend entièrement de la nature de la valuation retenue. En désignant par  $F$  une fonctionnelle permettant d'affecter une valuation scalaire en chacun des sommets de  $G$ , le partitionnement est exprimé comme le fruit de la transformation  $W(F; G)$  ; les frontières  $\bar{W}(F; G)$  entre régions sont exprimées sous la forme de lignes brisées - lignes de partage des eaux - et ne peuvent être matérialisées qu'*après* application de  $W(F; G)$ . En supposant l'existence d'une fonctionnelle permettant d'évaluer, en chacun des sommets, la paire de courbures principales  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  ordonnée suivant  $|\lambda_1| \geq |\lambda_2|$ , il est possible de proposer, selon des règles très intuitives, différents modes de partitionnement morphologique d'un support  $G$  non-euclidien. Quelques cas très simples sont illustrés par la figure 2 - analogue des lignes de crêtes : 1.a et 1.c, lignes paraboliques avec prise en compte d'ombilics étendus 1.d. Dans les cas réels, la distance géodésique joue souvent un rôle *primordial* et peut générer d'importantes distorsions si son calcul est mal maîtrisé.

Une série de sous-problèmes plus génériques, découlant entièrement du choix de la méthode - et des modes - de partitionnement, doit également être prise en considération afin de disposer d'une approche opérationnelle :

- **Gestion des systèmes de voisinage** : Celle-ci porte, pour un sommet  $p$ , sur trois types de voisinage. Le système  $N_G^l(p)$  découle du *graphe d'adjacence* de la tessellation et permet de contrôler la topologie de la surface et de sa décomposition. Le système  $N_G^l(p)$  est le *graphe de voisinage géodésique* paramétré par la distance  $l$  ; il inclut  $N_G^1(p)$  ainsi que les voisins situés à une distance géodésique inférieure ou égale à  $l$ . Un dernier système  $\hat{N}_G^l(p)$  représente un sous-ensemble de  $N_G^l(p)$  admettant une modélisation quadratique locale.

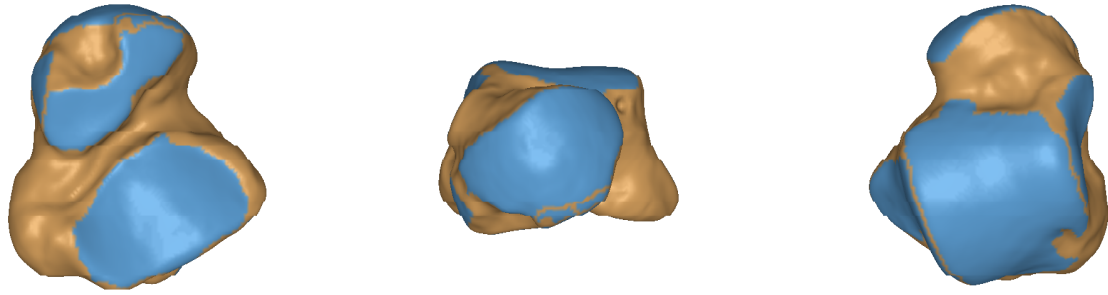


FIG. 3 : exemple de segmentation morphologique des surfaces articulaires d'un talus fossile (Spytal II). Les régions bleues sont assimilées aux surfaces articulaires et sont issues d'une désignation appliquée au sein d'un même niveau hiérarchique du partitionnement sous-jacent

- **Filtrage de la surface.** La valuation des sommets du graphe repose sur l'extraction des courbures principales en chacun des sommets ; il est donc impératif de limiter préalablement la partie haute du spectre de fréquence de la surface - lequel reflète essentiellement la présence d'artefacts. Une méthode générale et itérative [5] permet d'opérer un filtrage passe-bas de la surface tout en évitant sa contraction ; à l'issue d'une itération  $i$ , un sommet  $p$  est déplacé en une nouvelle position calculée en fonction de sa position courante et de celles - pondérées - de ses voisins inscrits dans  $N_G^{l,i}(p)$ .
- **Obtention des courbures.** Celles-ci s'obtiennent par une approche standard. Elle repose sur la définition d'un repère de Darboux - centré et orienté en fonction du sommet à valuer - et sur la connaissance de  $\hat{N}_G^l(p)$ . Les sommets retenus sont ensuite assimilés au graphe d'une fonction 2D ; une régression aux moindres carrés permet de modéliser le voisinage par un polynôme du second ordre et d'en déduire, après factorisation, les courbures principales.
- **Hiérarchisation du partitionnement.** Comme pour toute méthode de partitionnement à base de bassins versants, il est indispensable de hiérarchiser le partitionnement initial car celui-ci est toujours, en présence de données réelles, emprunt d'une forte sur-segmentation. Dans le cas des surfaces articulaires, la stratégie adoptée pour obtenir une agglomération

hiérarchique des composantes de  $W(|\lambda_i|; G)$  se réfère à l'aire de ces dernières ; un niveau  $i$  du partitionnement hiérarchique ne contient que des régions d'aire supérieure ou égale à  $\mu_i$  ; un bassin de taille inférieure est rattaché au bassin avec lequel il partage la frontière la plus perméable. Les régions représentées par la figure 3 sont obtenues suivant cette approche et appartiennent toutes à un même niveau hiérarchique. Une autre approche de la hiérarchisation d'un ensemble de bassins versants, décrite dans [6, 7, 8], repose sur une notion plus générale : la *dynamique* des contours.

#### 4 Exploitation du partitionnement

Le partitionnement hiérarchique peut être édité par un outil spécialisé. Les paramètres générés automatiquement par cet éditeur morphométrique, peuvent être, non seulement, des caractéristiques primaires (aires, angles, longueurs d'arcs spécifiques, ...) mais aussi des grandeurs reflétant des caractéristiques biomécaniques (axes de symétrie, axes de rotations et rayons associés) pouvant être instanciées graphiquement au sein du rendu. Le fait que le partitionnement offert à l'opérateur lui permette, pour un choix particulier de la valuation du support, de réunir les fragments d'une surface articulaire au sein d'une même sélection, autorise la mise en oeuvre automatique d'une modélisation robuste de la surface articulaire. La surface est

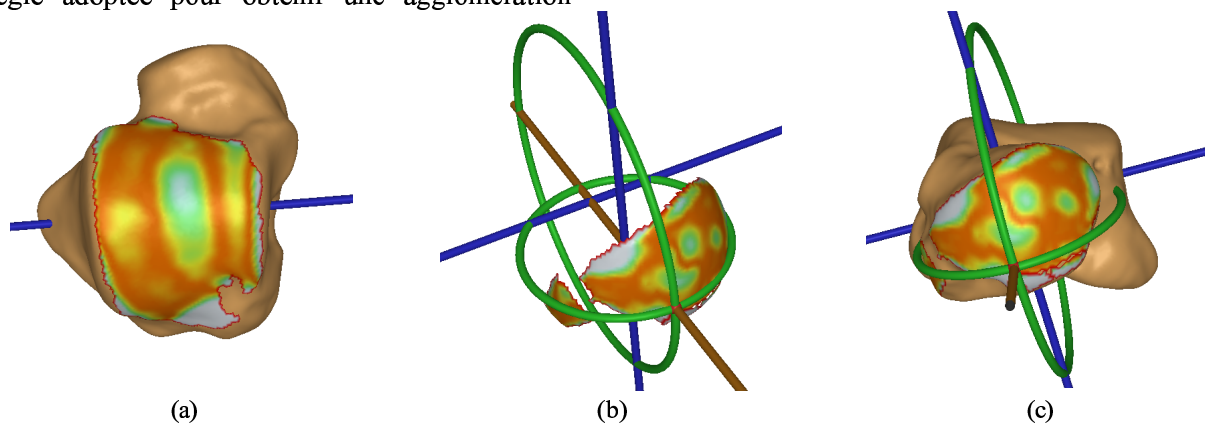


FIG. 4 : modélisation géométrique de la trochlée (a) et de la surface naviculaire (b et c) d'un talus (SpytalII)

modélisée par l'ensemble des zéros d'une forme quadratique dont les coefficients minimisent la distance géométrique approchée entre les sommets de la sélection et le modèle. Comme au moins 50% des sommets désignés sont assimilables au modèle, un estimateur robuste standard permet l'obtention des paramètres ainsi que le rejet des sommets non conformes au modèle ; l'estimateur retenu ne requiert que deux paramètres (sélectivité et convergence). La qualité de l'estimation (figure 4) peut être visuellement appréciée par l'intermédiaire d'un glissement de chrominance traduisant le degré local d'adéquation du modèle ; la meilleure adéquation est assimilée au rouge tandis que les régions blanches sont des régions totalement rejetées par l'estimateur. Les axes de symétrie, indirectement déduits du modèle quadratique, peuvent être incrustés automatiquement dans l'objet (figure 4).

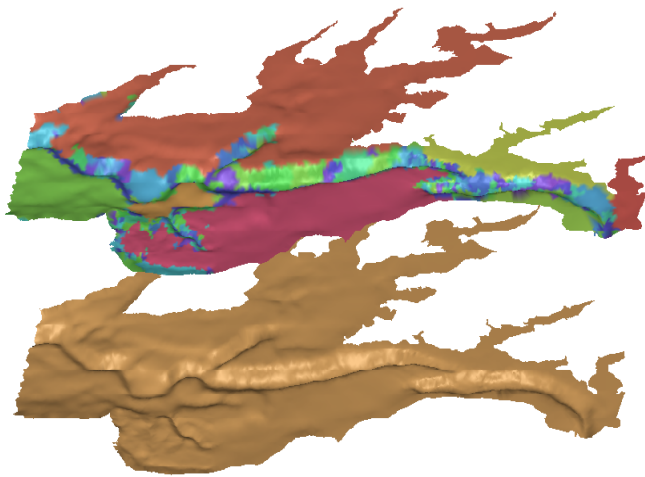


FIG. 5 : partition  $W(|\lambda_1|; G)$  de données bathymétriques mono-faisceau de la zone Est de la rade de Brest - les profondeurs réelles sont amplifiées d'un facteur 20

## 5 Perspectives

D'un point de vue plus général, la méthode de partitionnement global hiérarchique d'une surface offre, grâce à ses différents modes de décomposition, une grande généralité d'utilisation et peut être aisément appliquée au cas particulier des images de profondeur : partition d'objets manufacturés et décomposition de la forme d'un visage (vision robotique), identification des structures principales du relief (bathymétrie et orographie) avec pour avantage, dans ce dernier cas, de

pouvoir (voir les résultats préliminaires figure 5) opérer directement sur une tessellation des points de mesure.

## Références

- [1] J.J. Jacq, and C. Roux. "Automatic Detection of Articular Surfaces in 3-D Image through Minimal Subset Random Sampling". In J. Troccaz, E. Grimson, and R. Mösges, editors. *Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine. Lecture Notes in Computer Sciences* 1205, Springer-Verlag, pp. 73-82, Mar. 1997.
- [2] J.J. Jacq. "Partitionnement de Surfaces par Morphologie Géodésique. Application à la morphométrie Interactive du Complexe Péri-talien". In Proc. *Atelier Traitement et Analyse des Images, Méthodes et Applications TAIMA'99*, Hammamet, Tunisie, 23-26 Mar. 1999.
- [3] L. Vincent, and P. Soille. "Watersheds in Digital Spaces: an Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 6, pp. 583-598, Jun. 1991.
- [4] H. Tek, and B.B. Kimia "Volumetric Segmentation of Medical Images by Three-Dimensional Bubbles". *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 65, No. 2, pp. 246-258, Feb. 1997.
- [5] G. Taubin. "Curve and surface smoothing without shrinkage". In Proc. *Fifth International Conference on Computer Vision.*, pp. 852-857, Jun. 1995
- [6] L. Najman, and M. Schmitt. "Geodesic Saliency of Watershed Contours and Hierarchical Segmentation". *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 12, pp. 1163-1173, Dec. 1996.
- [7] C. Lemaréchal, R. Fjørtoft, P. Marthon, and E. Cubero-Castan. Comments on "Geodesic Saliency of Watershed Contours and Hierarchical Segmentation". *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 20, No. 7, pp. 762-763, Jul. 1998.
- [8] M. Schmitt. Response to Comment on "Geodesic Saliency of Watershed Contours and Hierarchical Segmentation". *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 20, No. 7, pp. 764-766, Jul. 1998.

**Remerciements** : Les auteurs remercient le Dr Marc Braun pour la numérisation 3D de spécimens fossiles du Musée de l'Homme ainsi que Nathalie Debese (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) pour la tessellation des données bathymétriques de la rade de Brest.