

Segmentation de maillages triangulaires et rectification directionnelle de frontières basées sur les tenseurs de courbure

G. Lavoué, F. Dupont, A. Baskurt

LIRIS FRE 2672 CNRS
43, Bd du 11 novembre, 69622 Villeurbanne Cedex, France
glavoue@liris.cnrs.fr

Résumé : Ce papier présente une méthode originale de segmentation de maillages triangulaires basée sur l'étude des tenseurs de courbure. Elle est une extension de celle proposée par Lavoué et al. [LAV04]. Elle se décompose en deux algorithmes distincts : une segmentation en régions surfaciques de courbure quasi-constantes, basée sur une classification des sommets et un mécanisme de croissance de régions, et une rectification des frontières basée sur les directions des tenseurs de courbure, qui corrige et redresse les frontières des régions extraites. Les résultats obtenus sur des objets naturels et issus de la CAO sont très satisfaisants. Les régions extraites, de part leur courbure constante et leurs frontières régulières sont particulièrement adaptées à des tâches telle que le plaquage de surfaces paramétriques ou de subdivision, dans un objectif de compression. Ce travail s'effectue dans le cadre du projet national RNRT Semantic-3D, avec la participation de Renault, TGS, INT, ENIC et Eurecom. Les thèmes en sont l'indexation, le tatouage et la compression d'objets 3D.

Mots-clés : Segmentation, tenseurs de courbure, classification, croissance de régions, fusion de régions, lignes de courbure, CAO.

1 Introduction

Les avancées technologiques récentes dans le domaine de l'infographie (outils pour l'acquisition, la création, la transmission d'objets 3D) ont contribué à un accroissement important de la quantité de modèles 3D créés et stockés. Avec l'expansion d'Internet, le besoin en transmission de ces contenus 3D est de plus en plus aigu, il en résulte des problématiques de compression adaptatives et multi-résolution, en particulier pour les maillages triangulaires, le format prépondérant en infographie. Dans ce contexte, la décomposition de ces objets 3D, en patches surfaciques, devient un enjeu crucial puisqu'elle simplifie la complexité des algorithmes, notamment de compression, en outre elle leur apporte une notion d'adaptativité. Dans ce contexte, nous présentons une méthode de segmentation de maillages3D basée sur les tenseurs de courbure particulièrement adaptée aux objets issus de la CAO. La méthode décompose le maillage en régions surfaciques de courbure quasi-constante et rectifie les frontières des patches extraits de manière à obtenir des frontières propres et régulières, particulièrement adaptées à des tâches telles que le plaquage de surface paramétriques ou de subdivision dans un objectif de compression adaptative. La section 2 détaille l'état de l'art en segmentation de maillages polygonaux et la section 3 présente l'algorithme général associé à notre méthode ; enfin les section 4 et 5 présente les deux différentes étapes de notre algorithme, la segmentation en région, et la rectification de frontières.

2 Travaux précédents

Peu de travaux ont été effectués sur la problématique de la décomposition surfacique de maillages. Garland et al. [GAR01] proposent une algorithme de regroupement de faces selon des critères de planarité plutôt adapté à la simplification et la radiosité. Plusieurs approches combinent l'analyse de la courbure avec un algorithme type Watershed [MAN99][SUN02][RAZ03], dans la même idée Zhang et al. [ZHA02] utilisent le signe de la courbure gaussienne pour décomposer l'objet ; dans ces approches, seules les régions entourées par de fortes courbures sont extraites. Lavoué et al. [LAV04] combine l'étude de la courbure avec un algorithme de classification qui permet une détection plus fine de similarité entre régions et qui détecte notamment toutes les transitions de courbure, notre méthode est une extension de cet algorithme. De manière tout à fait différente, Li et al. [LI01] proposent un algorithme basé sur le squelette qui donne de bons résultats mais induit un lissage trop important qui peut faire disparaître des détails de l'objet.

Pour la plupart de ces approches se pose le problème des frontières obtenues, soit elles sont floues (car seul les sommets sont considérés dans l'algorithme) [SUN02] [ZHA02], soit dentelées et non régulières [MAN99] [LAV04][RAZ03], soit trop lisses et ne collant plus au modèle [LI01]. Ce problème de frontière vient du fait qu'elles constituent une problématique secondaire dans les approches citées. Peu d'auteurs se sont penchés sur la problématique d'obtenir des frontières lisses. Seuls Katz et Tal [KAT03] utilisent les distances géodésiques pour extraire spécifiquement les frontières lisses correctes entre les parties significatives de l'objet, mais leur

décomposition basée sur des critères de convexité, ne donne pas des résultats assez précis dans le cas des objets CAO qui nous intéressent plus particulièrement.

3 Algorithme général

Nous présentons un algorithme de décomposition de maillages triangulaires en patches surfaciques de courbure quasi-constante et connue délimité par des frontières propres et régulières. Notre algorithme est particulièrement adapté aux pièces issues de la CAO mais des objets naturels sont également considérés. Notre approche se décompose en deux étapes (voir Fig.1):

La segmentation en régions surfaciques, basée sur la courbure : Une étape de prétraitement identifie les arêtes et les sommets aigus (voir la section 4.1). Cette information est nécessaire pour la suite de l'algorithme, en particulier dans le cas des maillages CAO triangulés de façon optimale. Ensuite les tenseurs de courbure sont calculés pour chaque sommet selon l'estimateur de Cohen-Steiner et al. [COH03]. Les sommets sont alors classifiés en clusters (voir la section 4.2), selon leurs valeurs de courbure principale K_{min} et K_{max} . Un algorithme de croissance de régions est ensuite effectué (voir la section 4.3) réunissant les triangles en régions connexes à partir des clusters de courbure des sommets. Un graphe d'adjacence des régions est alors construit et réduit afin de fusionner les régions semblables (voir la section 4.4) selon plusieurs critères (similitude de courbure, taille et périmètre commun).

La rectification de frontières: Les arêtes frontières sont extraites à partir des régions surfaciques issues de l'étape précédente. Pour chacune de ces arêtes, un score de *justesse* est calculé (voir la section 5.2) qui notifie un degré de cohérence de l'arête frontière par rapport aux directions principales de courbure. A partir de ce score, les arêtes estimées correctes sont marquées et servent de base pour un algorithme de suivi de contour (voir la section 5.3) qui extrait les frontières correctes finales de l'objet.

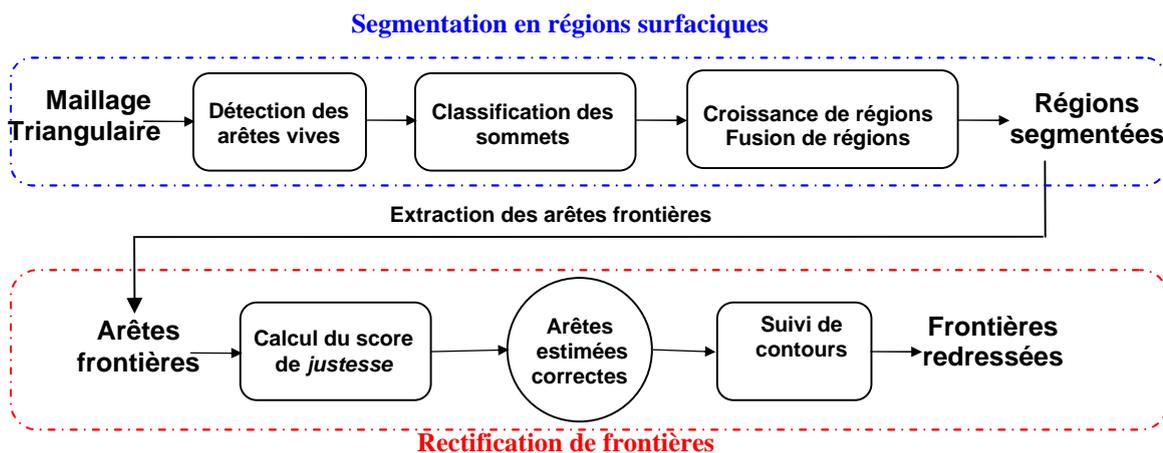


Figure 1. Les deux étapes de l'algorithme : la segmentation en régions et la rectification de frontières.

4 Segmentation en régions surfaciques

4.1 Détection des arêtes et sommets aigus.

Notre algorithme de segmentation est basé sur l'analyse de la courbure de chaque sommet. Il s'avère nécessaire de préalablement détecter et tenir compte des arêtes et sommets aigus de l'objet, en particulier pour les objets CAO. En effet, même si dans la pratique une valeur de courbure est associée à de tels entités, la courbure n'y pas théoriquement définie. Un bord aigu ne peut pas être simplement considéré comme une région de courbure élevée, il définit uniquement une frontière et non une région. C'est pourquoi nous procédons à une détection de ces entités. Une arête aiguë est définie comme suit: une arête partagée par deux triangles dont l'angle dièdre est supérieur à un seuil donné. Les sommets qui appartiennent à une arête aigue sont considérés comme des sommets aigus (mais une arête partagée par deux sommets aigus n'est pas nécessairement une arête aiguë). Cette détection est nécessaire dans le cadre du processus de croissance de régions (voir la section 4.3) et comme étape de prétraitement pour enrichir les maillages dans le cas d'objets mal ou trop peu tesselé, en particulier les objets CAO à triangulation optimisée qui contiennent un nombre minimum de triangles. Pour un triangle liée à trois sommets aigus, il s'avère impossible de raisonnablement évaluer sa courbure ou de l'associer à une région; ces triangles sont donc enrichis (voir Fig.12), dans la même idée que Razdan et Bae [RAZ03]. Un nouveau sommet est ajouté au centre. La segmentation en régions sera appliquée sur ce maillage modifié et les sommets supplémentaires seront supprimés à la fin de l'algorithme.

4.2 Classification des sommets.

Les sommets du maillage sont classifiés par rapport à leurs valeurs de courbures principales k_{min} et k_{max} . En outre, le procédé de rectification de frontières (voir section 5) repose sur une analyse des directions principales de courbure d_{min} et d_{max} principaux, ainsi ces informations doivent être calculées pour chaque sommet du maillage en entrée.

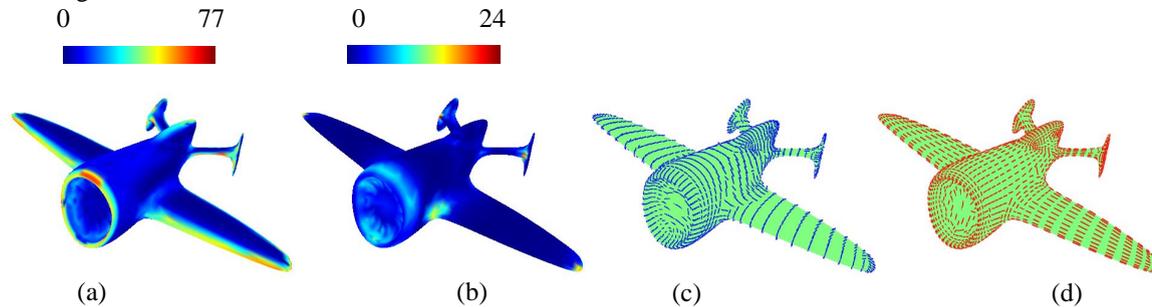


Figure 2. Les différents champs de courbure nécessaires à notre algorithme pour l'objet "avion". (a) K_{max} , (b) K_{min} (valeur absolue), (c) d_{max} , (d) d_{min} .

4.2.1 Estimation de la courbure discrète.

Un maillage de triangles est une surface linéaire par morceaux, ainsi le calcul de sa courbure n'est pas trivial. Plusieurs auteurs ont proposé différentes procédures d'estimation pour l'évaluation des tenseurs de courbure [COH03][MEY02][TAU95]. Nous avons implémenté l'estimateur de Cohen-Steiner et al. [COH03] basé sur le cycle normal. Ce procédé d'évaluation s'appuie sur de solides fondations théoriques et sur des propriétés de convergence. En outre le tenseur peut être estimé sur un voisinage géodésique [ALL03], il est donc indépendant de l'échantillonnage en triangles de l'objet. Pour chaque sommet, le tenseur de courbure est calculé et les courbures principales k_{min} , k_{max} et directions principales d_{min} , d_{max} sont extraites. Elles correspondent respectivement aux valeurs propres et aux vecteurs propres du tenseur de courbure, avec un ordre commuté (le vecteur propre lié à k_{min} est d_{max} et vice versa). La Fig.2 présente un exemple de ces champs de courbures pour l'objet « Avion ». Sur les bords des ailes, la courbure maximum est élevée, tandis k_{min} est nul, c'est une région parabolique. K_{min} est positif sur les régions elliptiques, comme à l'extrémité des ailes, et négatif dans les régions hyperboliques comme aux jointures entre les ailes et le corps de l'avion. Nous avons représenté la valeur absolue de k_{min} car son signe n'a aucune importance dans notre algorithme de classification. Les directions principales de courbure possèdent une signification uniquement dans les régions anisotropes (elliptique, parabolique ou hyperbolique) où elles représentent des lignes de courbure de l'objet. Sur les régions isotropes (sphérique, planaire), elles ne portent aucune information.

4.2.2 Classification de courbure.

Les sommets sont classifiés par rapport à leurs valeurs de courbures principales k_{min} et k_{max} (voir Fig.3), associées à la distance Euclidienne (dans l'espace des courbures). Cette classification est indépendante de la disposition spatiale des sommets.

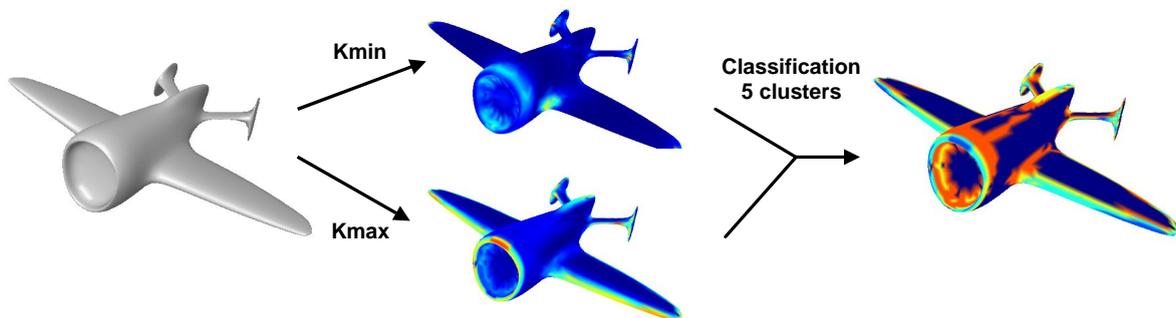


Figure 3. Classification des sommets du maillage "Avion" en 5 clusters.

Des mesures plus complexes et plus complètes existent pour comparer deux tenseurs [ALE00][BAS96] mais dans notre cas une mesure simple suffit, nous n'avons pas besoin de considérer les différences de directions ou de forme entre les tenseurs pour notre classification. En outre k_{min} et k_{max} portent une information complémentaire. k_{min} peut être négatif, mais nous considérons seulement sa valeur absolue, il n'est pas nécessaire de différencier les valeurs positives et négatives dans notre algorithme. L'algorithme utilisé est le K-

Means (un algorithme de classification non supervisé, simple et rapide) [GER92], suivi d'une régularisation des clusters (fusion des clusters trop petits ou trop semblables). À la fin de l'algorithme chaque sommet est associé à un cluster C_i et une valeur de courbure associée c_i (c_i est en fait un vecteur de deux scalaires composé des valeurs classifiées de k_{min} et k_{max}). Le nombre de clusters K , dans l'espace des courbures, est fixé par l'utilisateur, mais n'est pas un paramètre critique pour le résultat final de la segmentation, les résultats étant régularisés par les étapes de croissance et de fusion de régions. La Fig.3 montre le processus de classification appliqué à l'objet « Avion » (2506 sommets). Le nombre de clusters dans l'espace des courbures a été fixé à 5 pour cet exemple (les couleurs des différents clusters sont jaune, orange, bleu, bleu foncé et vert).

4.3 La croissance de régions.

Une fois que les sommets du maillage ont été classifiés, le but est de retrouver les régions de triangles de courbure similaire, il s'agit de transmettre l'information de courbure des sommets aux triangles du maillage. Un algorithme de croissance de régions et de labellisation est mis en place comme suit: Pour chaque triangle, dont la courbure est complètement définie (*triangle germe*), une nouvelle région est créée, labellisée puis étendue. Ce processus recommence pour chaque *triangle germe* non encore labellisé.

4.3.1. Détermination des *triangles germes*.

Il existe deux situations dans lesquelles un triangle est considéré comme un *germe*:

- Ses trois sommets appartiennent au même cluster C_i , et donc la valeur de courbure c_i de ce cluster est assigné à la région créée correspondante.
- Deux de ses sommets appartiennent au même cluster C_i et le troisième est un sommet aigu, la valeur c_i est donc assignée à la région créée.
- Il contient deux sommets aigus et donc la valeur de courbure c_i de son troisième sommet est assignée à la région créée.

Dans tout les autres cas, il s'avère impossible d'assigner une valeur de courbure au triangle, il ne peut donc pas être considéré comme un *germe* pour la création d'une nouvelle région.

4.3.2. Le mécanisme de croissance de région.

Pour chaque *triangle germe*, non encore labellisé, une nouvelle région est créée contenant ce triangle et associée à un label L et une valeur de courbure c_L .

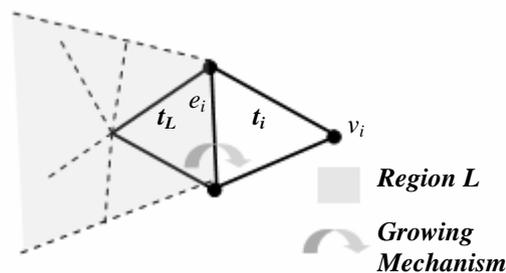


Figure 4. Le mécanisme de croissance de région.

Ensuite, un processus récursif étend cette région (voir Fig.4): pour chaque triangle t_L appartenant à la région, et pour chaque arête e_i non aiguë de ce triangle, nous considérons les triangle voisins t_i associés et les sommets opposés v_i de ces triangles. Si v_i est un sommet aigu ou s'il à la même valeur de courbure c_L , alors le triangle considéré est intégré à la région. A la fin de l'algorithme, il peut rester des triangles non labellisé, un processus simple intègre alors ces triangles à la région la plus représentée de leurs voisinages. La Fig.5 montre le résultat de la croissance de régions pour l'objet « Fandisk ». A partir d'une classification des sommets en 18 clusters, 128 régions connexes sont extraites.

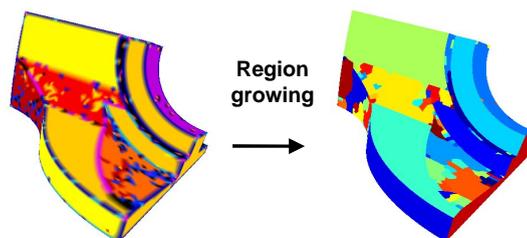


Figure 5. Le processus de croissance de région pour le maillage « Fandisk » (les couleurs sont aléatoires).

4.4 La fusion de régions.

L'algorithme de fusion possède deux objectifs:

- Réduire la sur-segmentation induite par le processus de croissance de régions.
- Supprimer la dépendance de l'algorithme au nombre de clusters issu de la classification de courbure.

Nous donnerons uniquement les grandes lignes de cet algorithme qui est présenté plus en détails dans [LAV04].

4.4.1 Algorithme général.

Une fois les régions de triangles créées par le processus de croissance de régions, un graphe d'adjacence des régions est calculé. Chaque nœud représente une région connexe et chaque arête, une relation d'adjacence entre deux régions, chaque arête étant associée à une distance de similarité. Le graphe est ensuite réduit : à chaque itération, l'arête de poids le plus faible est éliminée et les deux régions correspondantes sont fusionnées, puis le graphe est remis à jour. L'algorithme de fusion s'arrête quand le nombre de régions atteints un nombre fixé par l'utilisateur, ou bien quand le poids de la plus petite arête est supérieur à un seuil donné.

4.4.2 Mesure des distances entre régions.

La distance D_{ij} utilisée pour évaluer la similarité entre deux régions est une distance de courbure DC_{ij} , pondérée par deux facteurs: N_{ij} qui mesure l'imbrication des régions et S_{ij} qui joue un rôle de filtrage.

$$D_{ij} = DC_{ij} \times N_{ij} \times S_{ij} \quad (1)$$

La distance de courbure DC_{ij} est calculée à partir des courbures c_i et c_j des deux régions correspondantes et de la courbure c_{ij} de leur frontière.

$$DC_{ij} = \|c_i - c_{ij}\| + \|c_j - c_{ij}\| \quad (2)$$

c_i et c_j ont été définies au cours de l'étape de croissance de régions et c_{ij} est la moyenne des courbures des sommets de leur frontière commune.

Le coefficient N_{ij} mesure l'imbrication entre les deux régions, il prend en compte les périmètres respectifs P_i et P_j des deux régions considérées et leur périmètre commun P_{ij} .

$$N_{ij} = \frac{\min(P_i, P_j)}{P_{ij}} \quad (3)$$

Ce coefficient a été introduit en traitement d'image par Schettini [SCH93]. Les régions très entrelacées avec un grand périmètre commun ont plus de chance d'appartenir au même patch, leur distance de similarité est ainsi réduite.

Le coefficient S_{ij} a pour objectif d'accélérer la fusion des plus petites régions. Si une région possède une aire inférieure à un seuil A_{\min} fixé par l'utilisateur, alors sa distance avec ses régions voisines est réduite par un facteur e proche de 0.

$$S_{ij} = \begin{cases} e & \text{if } (A_i < A_{\min} \text{ or } A_j < A_{\min}) \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

La figure 6 présente le résultat de la fusion pour l'objet "Fandisk" issu de la phase de croissance de région (voir Fig. 5). Partant de 128 régions, le processus de fusion avec un seuil fixé à 5, donne 25 régions finales caractérisées par leurs valeurs de courbure.

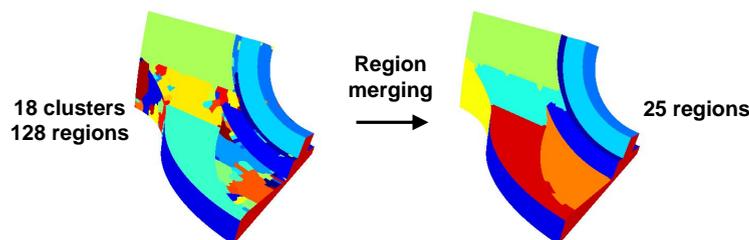


Figure 6. Le processus de fusion pour l'objet "Fandisk".

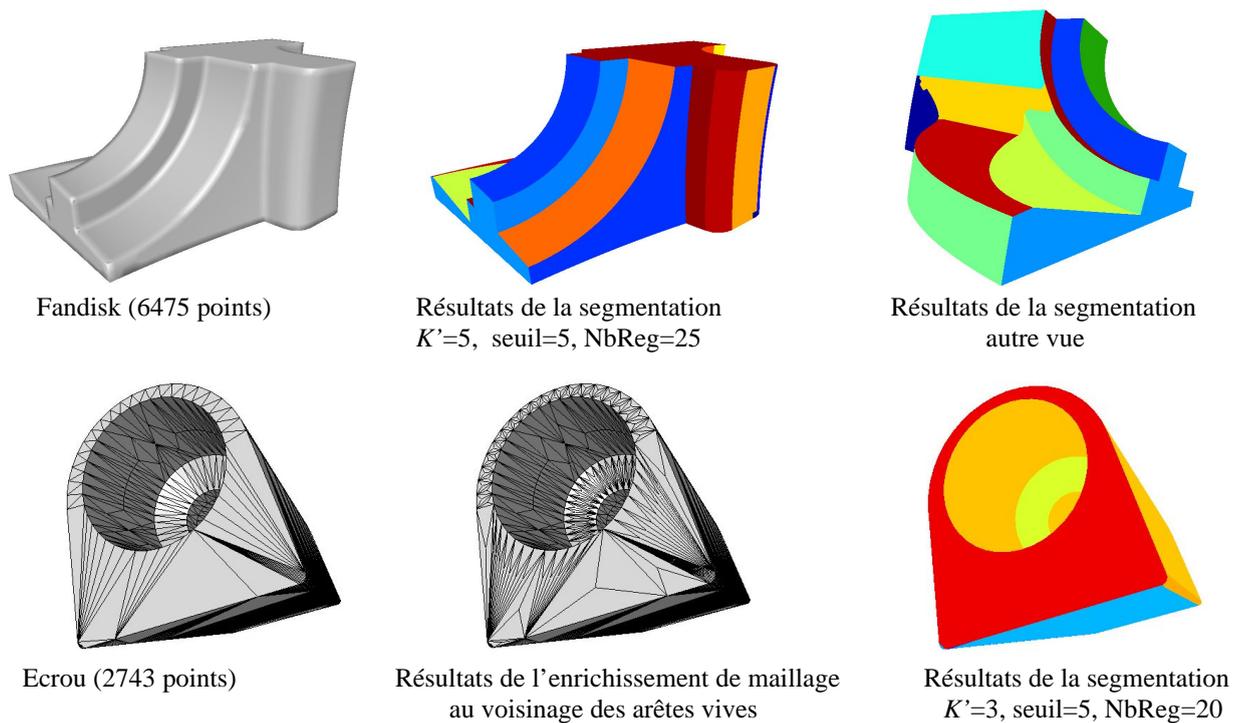


Figure 7. Segmentation des objet "Fandisk" et "Erou". Les seuils de fusion étant fixés à 5.

Notre méthode de segmentation en régions a été testé sur différents objets, des exemples sont donnés pour deux objets de natures complémentaires, un objet mécanique hautement triangulé (Fandisk), et un objet issu de la CAO, à triangulation optimisée (Erou). Les résultats sont présentés Fig.7. Pour l'objet "Fandisk" Nous obtenons des patches de courbure homogène donnant un découpage cohérent de l'objet. Notre méthode détecte les transition de courbure (par exemple les arrondis dans les coins), contrairement à la plupart des méthodes existantes qui découpe l'objet suivant ses pics de courbure. Concernant l'objet CAO, les résultats obtenus sont également très satisfaisant après enrichissement automatique du maillage.

5 La rectification de frontières.

5.1 Objectif.

Notre méthode de segmentation extrait des patches surfaciques topologiquement simples et de courbure quasi-constante et donne de bons résultats qualitatifs en terme de disposition et de forme générale des régions segmentées. Néanmoins, notre méthode, comme la plupart des méthodes existantes, n'extrait pas des frontières parfaites, sans discontinuités; généralement les frontières extraites sont dentelées et présentent des artefacts. La Fig.8 présente des exemples d'imprécisions: dans la Fig.8.a les régions bleues et jaunes dans l'ellipse ne sont pas correctes, leur frontières devrait être droite. De même dans la Fig.8.b, les régions vertes et roses ne sont pas complètes si l'on se réfère à l'objet original. Dans ce contexte, l'objectif de notre algorithme de rectification de frontières est de supprimer ces artefacts, afin d'obtenir des frontières propres, non dentelées, correspondant aux réelles frontières naturelles de l'objet. La méthode de rectification se compose de deux principales étapes: premièrement, les arêtes frontières sont extraites et pour chacune d'entre elles, un score de *justesse* est calculé. Puis, à partir des arêtes frontières estimées *correctes*, les frontières finales des patches sont extraites par un mécanisme de suivi de contours.

5.2 Définition du score frontière.

L'objectif de ce score est de définir une notion de *justesse* pour chaque arête frontière extraite de la segmentation en régions. À cette fin, nous considérons les directions de courbures principales d_{min} et d_{max} (voir la section 4.2.1) qui définissent les lignes de courbure de l'objet. En effet, elles représentent une information essentielle dans la description de la géométrie de l'objet [ALL03]. Les tenseurs de courbure aux frontières naturelles d'un objet tendent à être très anisotropes avec une direction maximum suivant la transition de courbure et donc orthogonale aux frontières. Ainsi les frontières tendront à être parallèles aux lignes de courbure minimum. La

Fig.9.a montre une segmentation naturelle, intuitive, effectuée à la main, d'un cube lissé, en patches de courbure quasi constante. La Fig.9.b montre les directions maximum et minimum de courbure de cet objet.

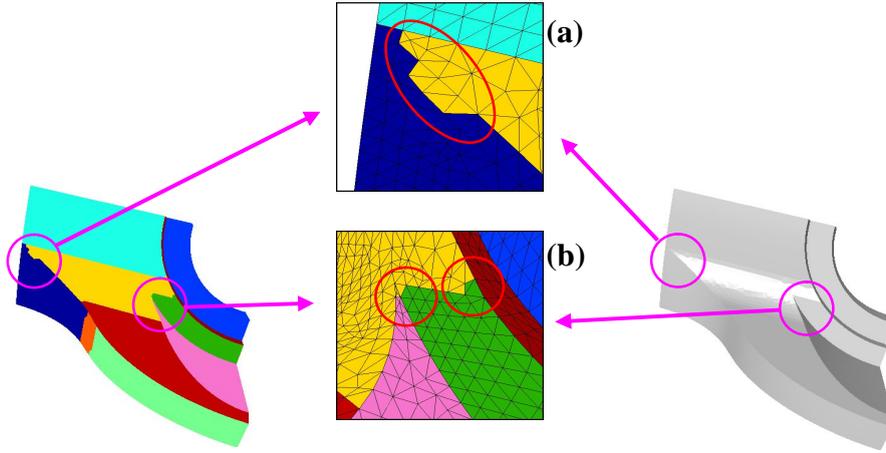


Figure 8. ZOOMS sur des artefacts (imprécisions sur les frontières) issus de la segmentation de l'objet "Fandisk".

Les frontières des patches suivent les directions minimum de courbure, excepté dans les régions isotropes (aux coins du cube). En conséquence l'angle entre une arête frontière et les directions de courbure minimum de ses sommets représente une bonne évaluation de sa *justesse*.

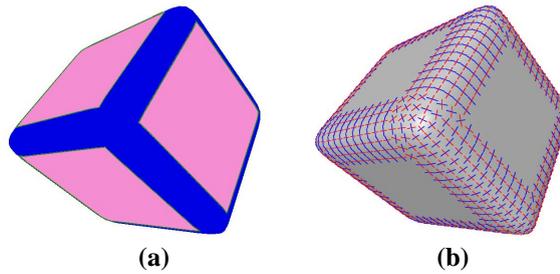


Figure 9. Décomposition naturelle intuitive de l'objet "Cube" (a) et ses directions principales de courbure (b), d_{min} en rouge et d_{max} en bleu.

Le *score frontière* S , pour une arête e_i , est défini par :

$$S(e_i) = S_a(e_i) + w_c \times S_c(e_i) \quad (5)$$

w_c est un coefficient de pondération fixé à 1 dans nos exemples (S_a et S_c étant normalisé).

Le *score d'angle* S_a considère les angles $J_{min_{i1}}$ et $J_{min_{i2}}$ (voir Fig.10) entre l'arête e_i et les directions minimum de ses sommets. Ce score considère aussi les angles $J_{max_{i1}}$ et $J_{max_{i2}}$ entre l'arête e_i et les directions maximum de ses sommets, pondérés par les valeurs K_{min} et K_{max} afin de prendre en compte les régions isotropes (Le coin du cube en Fig.9, par exemple). Ainsi, le *score d'angle* S_a est défini comme suit:

$$S_a(e_i) = \frac{(J_{min_{i1}} \times K_{max_{i1}} + J_{max_{i1}} \times K_{min_{i1}})}{K_{max_{i1}} + K_{min_{i1}}} + \frac{(J_{min_{i2}} \times K_{max_{i2}} + J_{max_{i2}} \times K_{min_{i2}})}{K_{max_{i2}} + K_{min_{i2}}} \quad (6)$$

avec $J_{min_{i1}}$, $J_{min_{i2}}$ et $J_{max_{i1}}$, $J_{max_{i2}}$ les angles respectifs de l'arête considérée e_i avec les directions minimum de ses sommets et leur directions maximum. $K_{min_{i1}}$, $K_{min_{i2}}$ et $K_{max_{i1}}$, $K_{max_{i2}}$ sont les valeurs respectives des courbures minimum et maximum des sommets de l'arête e_i .

Le *score de courbure* S_c correspond à une différence normalisée entre les valeurs de courbure des deux sommets de l'arête considérée. Si ses sommets ont une courbure trop différente, l'arête ne peut pas être considérée comme une frontière correcte. S_c est défini par l'équation suivante :

$$Sc(e_i) = \frac{|Kmin_{i2} - Kmin_{i1}| + |Kmax_{i2} - Kmax_{i1}|}{\max(Kmin_{i2}, Kmin_{i1}) + \max(Kmax_{i2}, Kmax_{i1})} \quad (7)$$

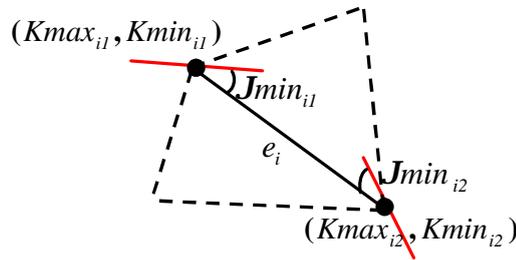


Figure 10. Éléments pris en compte dans le calcul du *score frontière* de l'arête e_i .

5.3 Algorithme

L'algorithme de rectification se compose de deux étapes: Le marquage des arêtes frontières correctes issues de la segmentation en régions, et le suivi de contours qui vise à compléter les frontières finales de l'objet segmenté.

5.3.1 Marquage des frontières correctes.

Pour chaque arête frontière provenant de l'étape de segmentation, le *score frontière* défini précédemment est calculé. Un seuil ST est ensuite fixé; pour chaque arête, si son *score frontière* est inférieur à ST , alors l'arête est considérée comme une *arête frontière correcte* (AFC). La Fig.12.c et la Fig.13.c montrent ce processus de marquage, à partir des résultats de la segmentation (voir Fig.12.a, le Fig.13.b), les AFC sont représentées en vert, les autres en rouge.

5.3.2 Suivi de contours.

La deuxième étape de l'algorithme de rectification est le suivi de contours. Une fois que les AFC ont été extraites, elles forment des morceaux de contours frontières; notre but est de les compléter pour obtenir un ensemble de contours fermés correspondant aux frontières finales des patches de l'objet. Pour chaque contour frontière non fermé, nous extrayons les arêtes du maillage pouvant potentiellement le compléter (Les *arêtes potentielles*), ce sont les arêtes adjacentes à une AFC à une extrémité du contour. La Fig.11.a montre un morceau de contour constitué par deux AFC (représentées en noir), avec les *arêtes potentielles* (AP) associées (représentées en noir pointillé) qui sont des candidates pour compléter le contour ouvert. Ensuite, chaque *arête potentielle* est associée à un poids P qui détermine ses possibilités d'intégration au contour; plus P est petit, plus l'*arête potentielle* considérée a de chance d'être intégrée.

Le poids P dépend du *score frontière* de l'arête considérée mais également de son angle avec son AFC adjacente, afin de limiter la déviation de la frontière.

$$P(e_i) = S(e_i) + w_J \times J(e_i, e_{AFC}) \quad (8)$$

w_J est un coefficient de pondération, il est fixé à 1 dans nos exemples.

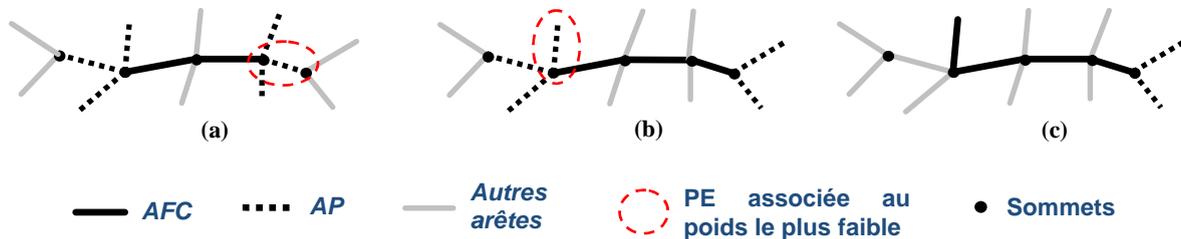


Figure 11. Trois itérations (a,b,c) de l'algorithme de suivi de contours, avec les positions associées des *arêtes frontières correctes* (AFC), *arêtes potentielles* (AP) et de l'arête associée au poids P le plus faible.

Une fois que chaque AP a été évaluée par un poids P , elles sont organisées en une liste triée. Puis l'algorithme de suivi de contours s'exécute, son mécanisme est le suivant : une fois la liste créée, l'AP associée au poids P le plus faible est extraite et intégrée au contour considéré, et donc cette *arête potentielle* devient une *arête frontière correcte* (AFC). La liste est ensuite mise à jour (les AP sont redistribuées) et l'algorithme continue jusqu'à ce que chaque contour de frontière soit fermé. La Fig.11 présente trois itérations de l'algorithme. Dans la Fig.11.a, deux AFC forment un contour ouvert (en noir), et il y a six AP candidats pour le compléter (en noir pointillé).

L'AP à l'intérieur de l'ellipse rouge est considérée comme celle associée au plus petit poids P , et donc à l'itération suivante elle est intégrée au contour (voir la Fig.11.b). La position et le nombre des AP sont alors mis à jour. Le processus continue dans la Fig.11.c, avec une autre *arête potentielle* intégrée au contour.

5.4 Résultats.

La méthode de rectification est particulièrement adaptée aux objets CAO ou mécaniques, là où existent de vraies frontières régulières définies. Sur les objets naturels ou organiques le fait de rectifier les frontières n'a pas une réelle signification puisque même manuellement, il est souvent impossible de définir des frontières précises et lisses. Nous avons testé notre algorithme de rectification sur différents modèles. La Fig.12 présente les résultats pour l'objet « Fandisk ». Les artefacts provenant de la segmentation en régions sont correctement supprimés; nous obtenons des patches avec des frontières rectifiées, régulières et lisses, particulièrement adaptées à des algorithmes tels que le plaquage de surfaces paramétriques ou de subdivision.

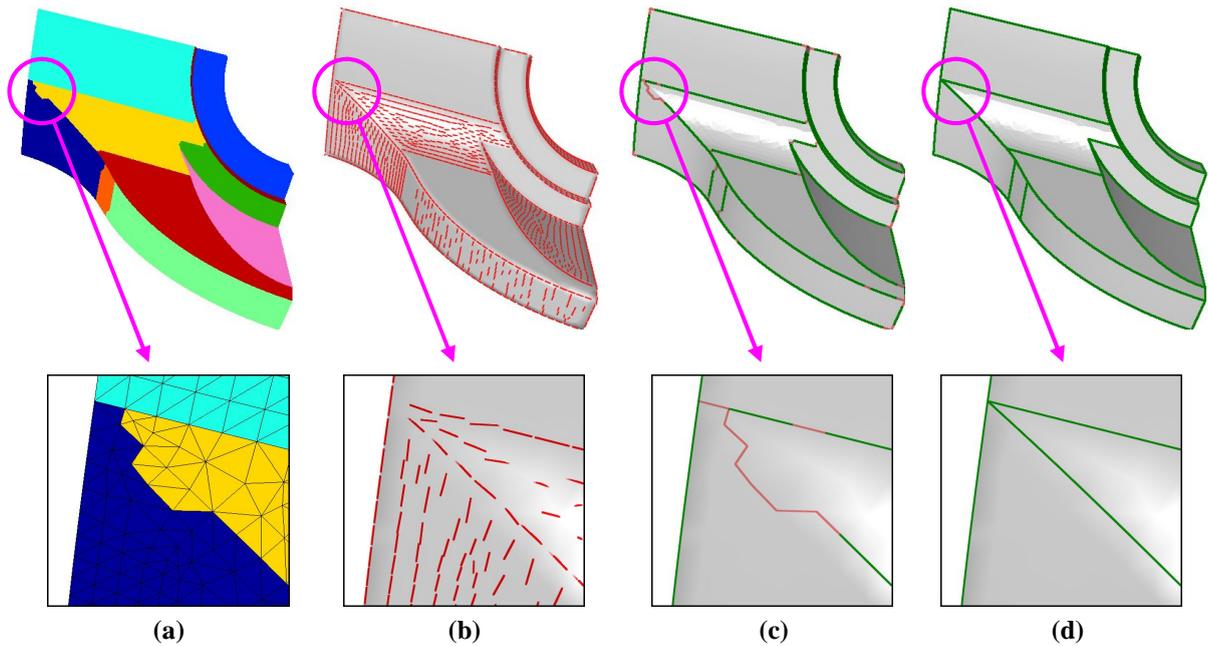


Figure 12. Les différentes étapes de la rectification de frontières pour l'objet "Fandisk" avec un zoom sur des artefacts et leurs corrections. (a) Objet segmenté. (b) Directions de courbure minimum. (c) Marquage des arêtes correctes (en vert). (d) Frontières finales après suivi de contours.

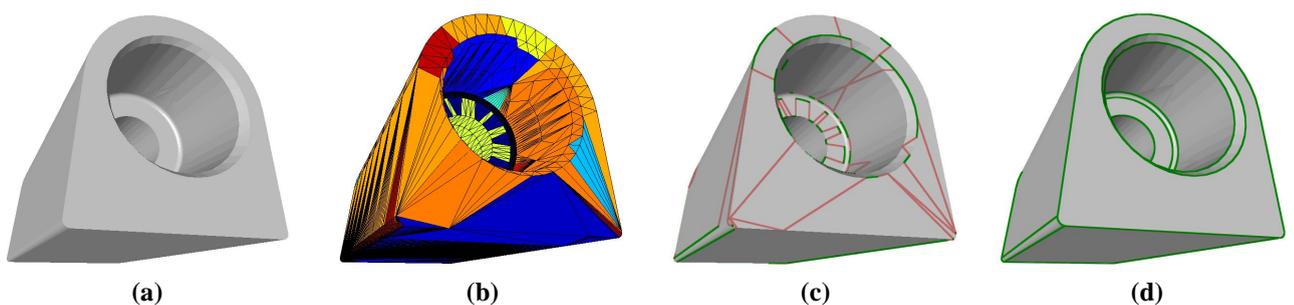


Figure 13. Les différentes étapes de la rectification de frontières pour un objet CAO artificiellement mal segmenté. (a) Objet original. (b) Objet mal segmenté. (c) Marquage des arêtes correctes. (d) Frontières finales après suivi de contours.

Nous avons également effectué des tests sur des objets artificiellement mal segmentés, afin d'étudier le comportement de la méthode dans ces cas limites. La Fig.13 montre les résultats pour l'objet « Ecrou ». Malgré le petit nombre d'arêtes correctes, celles-ci sont correctement extraites et complétées pour donner un ensemble très satisfaisant de contours frontières finaux. La rectification peut alors être vue non seulement comme une méthode de suppression d'imperfections mais aussi comme une méthode de réparation de mauvaises segmentations. Ce procédé de rectification est indépendant de la méthode de segmentation présentée dans la section 4; nous pouvons imaginer l'employer comme processus de suivi de contour après une détection d'arêtes vives par exemple.

6 Conclusion.

Cet article présente une méthode originale de décomposition d'un maillage 3D en patches surfaciques de courbure quasi-constante et délimités par des frontières lisses, sans artefacts. La méthode simple et efficace de classification détecte les transitions de courbure et ne découpe pas seulement l'objet le long de ses arêtes vives ou de forte courbure. Le mécanisme de croissance de régions extrait des régions de triangles homogènes en termes de courbure de manière très efficace, même pour les objets CAO, que peu de méthodes existantes sont capable de traiter. Notre méthode originale de rectification de frontières basée sur l'orientation des tenseurs de courbure, permet de supprimer les artefacts généralement produits par les algorithmes de segmentation. Nous obtenons, dans le cas d'objets CAO ou mécaniques, les frontières naturelles correspondant à un découpage intuitif à la main de l'objet. La méthode de rectification est indépendante de la segmentation en région et peut être employée comme post-processus à n'importe quel algorithme de décomposition ou détection de contours. Concernant les perspectives, nous projetons de considérer la variance et la distribution d'histogramme des courbures, afin d'améliorer la méthode de classification d'une part, et d'autre part de tendre vers une détermination automatique du seuil de fusion des régions qui demeure un paramètre critique de notre méthode. Ce travail s'inscrit dans un objectif plus large de compression. L'objectif est d'approximer les sous-surfaces segmentées par des surfaces de subdivision ou des surfaces paramétriques, ceci afin d'obtenir l'objet sous la forme d'un ensemble de patches « légers » en termes de données qui permettraient une compression et une transmission adaptative et scalable.

7 Bibliographie

- [LAV04] G. Lavoue, F. Dupont and A. Baskurt, "Constant Curvature Region Decomposition of 3D-Meshes by a Mixed Approach Vertex-Triangle.", *Journal of WSCG*, 2004, vol. 12, no. 2, pp. 245-252.
- [GAR01] M. Garland, A. Willmott and P. Heckbert, "Hierarchical face clustering on polygonal surfaces.", *ACM Symposium on Interactive 3D Graphics.*, 2001, pp. 49-58, .
- [MAN99] A. Mangan and R. Whitaker, "Partitioning 3D Surface Meshes Using Watershed Segmentation", *IEEE Visualization and Computer Graphics*, 1999, vol. 5, no. 4, pp. 308-321.
- [SUN02] Y. Sun, D. Page, J. PAIK, A. Koschan and M. Abidi, "Triangle Mesh-Based Edge Detection And Its Application To Surface Segmentation And Adaptive Surface Smoothing", *IEEE International Conference on Image Processing*, NY, USA, 2002, Vol. 3, 825-28.
- [RAZ03] A. Razdan and M. Bae, "A hybrid approach to feature segmentation of triangle meshes", *Computer-Aided Design*, 2003, vol. 35, no. 9, pp. 783-789.
- [ZHA02] Y. Zhang, J. PAIK, A. Koschan, M. Abidi and D. Gorsich, "A simple and efficient algorithm for part decomposition of 3D triangulated models based on curvature analysis", *IEEE International Conference on Image Processing*, Rochester, NY, USA, 2002, vol. 3, pp. 273-76.
- [KAT03] S. Katz and A. Tal, "Hierarchical Mesh Decomposition Using Fuzzy Clustering and Cuts", *ACM Transactions on Graphics*, 2003, vol. 22, no. 3, pp. 954-961, .
- [LI01] I. Li, T. Toon, T. Tan and Z. Huang, "Decomposing polygon meshes for interactive applications.", *symposium on Interactive 3D graphics*, 2001, pp. 35-42, .
- [COH03] D. Cohen-Steiner and J. Morvan, "Restricted delaunay triangulations and normal cycle", *19th Annu. ACM Sympos. Comput. Geom.*, 2003, pp. 237-246.
- [MEY95] M. Meyer, M. Desbrun, P. Schröder and H. Barr, "Discrete Differential-Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds.", *International Workshop on Visualization and Mathematics*, Berlin, Germany, 2002.
- [TAU95] G. Taubin, "Estimating the Tensor of Curvature of a Surface from a Polyhedral Approximation", *Fifth International Conference on Computer Vision*, 1995, pp. 902-907.
- [ALL03] P. Alliez, D. Cohen-Steiner, O. Devillers, B. Levy and M. Desbrun, "Anisotropic Polygonal Remeshing", *ACM Transactions on Graphics, SIGGRAPH '2003 Conference Proceedings*, 2003, vol. 22, no. 3, pp. 485-493.
- [ALE00] D. Alexander and J. Gee, "Elastic Matching of Diffusion Tensor Images", *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, vol. 77, pp. 233-250.
- [BAS96] P. Basser and C. Pierpaoli, "Microstructural and Physiological Features of Tissues Elucidated by Quantitative Diffusion Tensor MRI", *Journal of Magnetic Resonance*, 1996, vol. 111, pp. 209-219.
- [GER92] A. Gersho and R. Gray , *Vector Quantization and Signal Compression*, Boston, USA, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [SCH93] R. Schettini, "A Segmentation Algorithm For Color Images", *Pattern Recognition Letters*, 1993, vol. 14, pp. 499-506.