

Segmentation 3D hiérarchique par ligne de partage des eaux sans biais

Unbiased Watershed 3D Hierarchical Segmentation

Jonathan BETSER, Sébastien DELEST, Romuald BONÉ

Université François-Rabelais de Tours,

Laboratoire d'Informatique,

64, avenue Jean Portalis,

37200 Tours, France,

jonathan.betsler@etu.univ-tours.fr, {sebastien.delest, romuald.bone}@univ-tours.fr

Résumé

Cet article présente une méthode de segmentation 3D rapide et robuste en se basant sur les techniques 2D hiérarchiques et par marqueurs de la Ligne de Partage des Eaux (LPE). Ces méthodes utilisent l'algorithme par Files d'Attentes Hiérarchiques (FAH) sans biais de S. Beucher [3] qui a été adapté afin de calculer de manière rapide et exacte la LPE des surfaces 3D triangulées.

Une évaluation des méthodes actuelles de calcul de la courbure discrète a montré que les algorithmes de LPE hiérarchiques (cascades) donnent de meilleurs résultats en utilisant la matrice de covariance ou le Kmax.

L'utilisation de l'algorithme des cascades en 3D fonctionne de manière plus robuste et plus rapide en utilisant le graphe des points selles plutôt que la technique de modification d'homotopie. Cependant, on constate avec cette méthode que trop de fusions sont réalisées d'un niveau de la hiérarchie à l'autre. C'est pourquoi un algorithme hybride, combinant l'approche par cascades et par fusions hiérarchisées a été proposé. Il permet, sur un critère de nombre de régions souhaitées, d'obtenir une segmentation rapide et efficace des modèles 3D surfaciques. Cet algorithme s'adapte bien aux problématiques de segmentation dans l'industrie pour lesquelles l'utilisateur a une idée du nombre de régions nécessaires pour caractériser un modèle donné.

Mots Clef

Courbure, cascade, segmentation hiérarchique, fusion.

Abstract

We propose fast and robust 3D segmentation method using marker-based and hierarchical 2D watershed techniques. These methods are based on the hierarchical queue unbiased 2D watershed algorithm, invented by S. Beucher [3] which has been adapted in order to obtain rapidly the exact watershed of triangulated 3D meshes.

An evaluation of usual discrete curvature criteria shows that waterfall algorithms provide best results when using the covariance matrix method and the Kmax method [7].

The waterfall hierarchical 3D algorithm is faster and more robust when constructing the saddle point graph than using the homotopy modification technique. However, it can be noticed that too many areas are merged from a hierarchical level to the next one. That is why a hybrid algorithm, combining waterfall and hierarchical merging approaches is proposed. It makes it possible to obtain a fast and efficient surface 3D model segmentation. This algorithm well adapts to industrial segmentation problems for which, in many cases, the number of necessary regions to characterize a given 3D model can be estimated by users.

Key Words

Curvature, waterfall, hierarchical segmentation, merging.

1. Introduction

La méthode de Ligne de Partage des Eaux proposée par Digabel et Lantuéjoul [1] est un outil morphologique qui a été longtemps considéré comme l'étape finale d'un processus de segmentation. De nombreux pré-traitements (filtres, opérateurs morphologiques) ont eu alors pour but de réduire le nombre de régions non significatives tout en conservant les contours réels. Néanmoins, les travaux de S. Beucher [2] ont démontré les limites de ces méthodes et ont mis en avant une approche de niveau supérieur, en considérant alors la LPE comme un simple opérateur morphologique de base. De cette approche a résulté l'apparition des algorithmes de LPE hiérarchique et de LPE par marqueurs. Dans cet article, nous allons montrer comment adapter les méthodes par marqueurs et hiérarchiques à la segmentation de surfaces 3D triangulées, en prenant en compte les critères de qualité de la segmentation ainsi que de vitesse de calcul. Nous allons dans un premier temps présenter l'algorithme de calcul rapide de la LPE 2D par FAH sans biais, inventé par S. Beucher [3] et montrer de quelle façon il peut s'adapter à la 3D. Ensuite, nous ferons un bref état de l'art des différentes méthodes de calcul de courbures discrètes sur

lesquelles nous nous baserons pour définir la hauteur du relief du maillage. Enfin, un nouvel algorithme de segmentation hiérarchique basé sur le principe hiérarchique des cascades sera présenté avec ses résultats.

2. La LPE par FAH sans biais

2.1 Généralités sur la LPE 2D

La LPE est une technique de segmentation qui consiste à simuler la montée des eaux sur le gradient de l'image d'entrée depuis ses minima locaux. Cela permet de générer des lignes de partage aux endroits où les bassins se rejoignent, définissant ainsi un SKIZ géodésique de l'image. Un SKIZ géodésique est un ensemble de lignes continues divisant une image en un ensemble de régions d'influence équivalentes. Ainsi, on obtient au final un découpage de l'image en régions dans lesquelles l'intensité lumineuse des pixels est relativement homogène. La figure 1 représente les termes usuels concernant l'homotopie d'une image 2D.

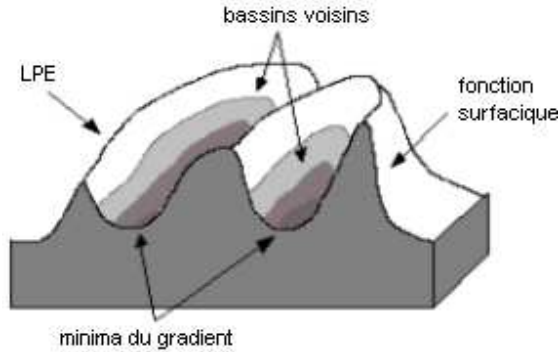


Figure 1 : Representation of a 2D image homotopy [2]

Généralement, l'opérateur LPE ne peut fonctionner seul car il génère trop de régions non significatives (autant qu'il y a de minima dans l'image). C'est pourquoi il s'intègre dans un processus de segmentation au cours duquel on applique soit un filtrage avant le traitement, soit des techniques plus avancées que nous allons présenter plus loin dans cet article. Les méthodes d'élimination de bassins non significatifs par prétraitement en utilisant des filtres gaussiens ou moyenneurs sont limitées car elles sont peu robustes. Il est difficile par ailleurs de trouver un filtre générique permettant d'obtenir des résultats satisfaisants sur tout type d'image et d'éviter l'élimination de bassins significatifs.

2.2 Présentation de l'algorithme

L'utilisation des Files d'Attente Hiérarchiques a pour but d'accélérer le calcul de la Ligne de Partage des Eaux. La diminution de la complexité du calcul de la LPE est d'une importance majeure, d'autant plus qu'il nous faudra plusieurs itérations de l'algorithme pour pouvoir réaliser la segmentation hiérarchique. Contrairement aux précédents algorithmes par immersion dont le plus connu est celui de Vincent-Soille [4], il ne s'agit plus à présent

de calculer sur la base d'une file d'attente FIFO simple un SKIZ puis une reconstruction niveau par niveau, mais plutôt de réaliser ces calculs sur celle d'un ensemble hiérarchisé de files simples dont la position hiérarchique donne une information sur la priorité d'un pixel à traiter par rapport aux autres.

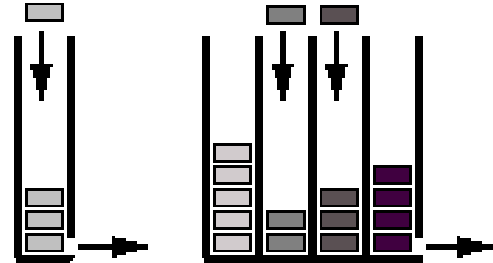


Figure 2 : Simple FIFO queue and Hierarchical Queues [3]

Cette information est structurale et ne consomme donc pas de temps de calcul. Cela permet ainsi de générer la modification d'homotopie et la propagation des eaux sur les pixels plateau à la volée.

Il existe plusieurs algorithmes de LPE par FAH. Le plus simple consiste à créer autant de piles qu'il y a de niveaux dans l'image traitée. Les pixels observés dans le voisinage des pixels traités tout au long de l'immersion seront ainsi placés dans la pile correspondant à leur niveau dans l'image. La priorité reposant à priori uniquement sur le niveau du pixel par rapport aux autres, il ne devrait y avoir aucun moyen de définir un ordre de préférence pour traiter deux pixels de même niveau, si ce n'est la proximité du pixel par rapport aux bassins existants. Or, si on suit ce modèle, un des deux pixels sera traité avant l'autre selon l'ordre dans lequel il a été placé dans la pile. Cette manière arbitraire de propager les eaux sur les plateaux génère des erreurs sur la position de la LPE, qui en s'accumulant peuvent être à l'origine d'un décalage non négligeable, c'est ce qu'on appelle le biais de la LPE.

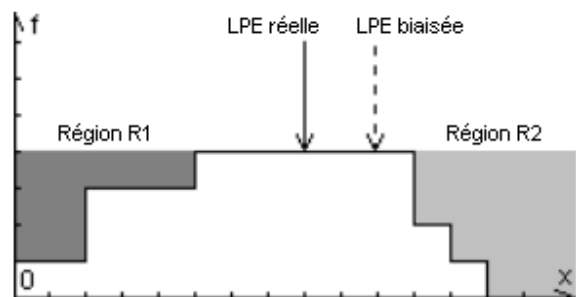


Figure 3 : Biais de la LPE

Pour éliminer ce biais, il faut compliquer un peu l'algorithme de base de la LPE par FAH en rajoutant une pile qui va permettre de gérer la priorité des pixels sur les plateaux. Cela revient à combiner le système de pile simple utilisé dans l'algorithme de Vincent-Soille [4] avec l'algorithme de LPE par FAH biaisée. Afin d'accélérer le processus, S. Beucher [3] a proposé un système astucieux de codage des distances et des labels qui permet de s'affranchir du tableau des distances qui

était précédemment utilisé dans l'algorithme de Vincent-Soille [4] et qui nécessitait une remise à zéro coûteuse en temps à chaque niveau. Ce codage consiste tout d'abord à associer une valeur paire à un label définitif, et une valeur impaire à un label provisoire. Au départ, chaque minimum local prend une valeur impaire et est placé dans la FAH. Ensuite, on dépile le premier pixel. S'il possède deux voisins de labels pairs différents c'est une LPE, sinon il prendra son propre label pair associé. A chaque fois, après avoir rendu définitif le pixel au sortir de la FAH, on explore son voisinage qu'on labellise de manière temporaire avant de le placer dans la FAH. Pour ce qui est de la propagation sur les plateaux, une pile simple (appelée alpha) de priorité supérieure gère les pixels du voisinage qui sont de même niveau. Pour éviter l'utilisation d'un tableau pour mémoriser les distances des pixels par rapport aux bassins existants, on les code directement dans une plage de valeurs non utilisée de l'image d'entrée.

2.3 Adaptation à la 3D

2.3.1 Critère de courbure

Notre but dans cet partie est de montrer comment appliquer l'algorithme de la FAH sans biais à des surfaces maillées triangulaires. Comme pour beaucoup d'autres méthodes de segmentation de surfaces 3D, comme par exemple la méthode top-down de Mangan et Whitaker [5], nous allons considérer un maillage 3D comme un graphe planaire dont la connexité est variable. Pour pouvoir appliquer un algorithme de LPE sur ce graphe, il nous faut définir une fonction qui va associer à chaque vertex la hauteur du relief. Cette valeur doit être entière puisque la LPE par FAH sans biais va associer une pile à chaque niveau et définit ainsi une correspondance entre le numéro de la pile et la hauteur du relief. Cette fonction doit permettre de mettre en évidence les bords et les discontinuités des modèles 3D, car c'est précisément à ces endroits qu'on voudrait placer nos lignes de partage. Le calcul de la courbure discrète est un moyen simple et rapide d'obtenir une telle caractérisation.

L'influence du choix de critère d'évaluation de la courbure discrète est faible et même négligeable pour une utilisation sur des modèles 3D industriels. Cependant, les différences deviennent significatives lorsqu'on considère des objets naturels. C'est pourquoi il est important d'évaluer les différentes méthodes existantes pour sélectionner celle qui donne les meilleurs résultats sur le plus grand nombre de modèles 3D.

2.3.2 Matrice de covariance

Le calcul de la courbure par la matrice de covariance repose sur un concept statistique qui consiste à évaluer les variances et covariances des coordonnées des différents vertices appartenant au voisinage. La méthode a été présentée par A. Mangan et R. Whitaker [5].

Pour un vertex donné, la courbure C s'exprime de la manière suivante :

$$C = \|M\| \text{ avec } M = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

où σ_{uu} représente l'écart type des coordonnées en u du voisinage du vertex, et σ_{uv} représente la racine carrée de la covariance entre les composantes en u et les composantes en v :

$$\sigma_{uu}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (u_i - \bar{u})^2$$

$$\sigma_{uv}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})$$

2.3.3 Somme des angles

Un principe simple pour évaluer la courbure d'une surface en un point donné est de calculer la somme des angles issus de ce point. Cette méthode intuitive, proposée par Srinark [6], a pour effet de distinguer une zone plate (somme des angles élevée) d'une zone fortement discontinue (somme des angles faible).

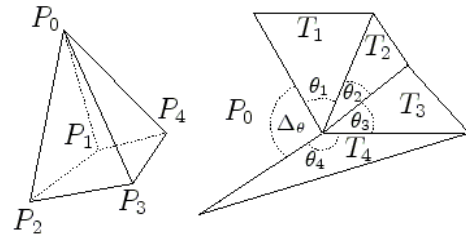


Figure 4 : Courbure par somme des angles en P_0

Afin d'avoir une forte courbure pour une surface fortement discontinue on utilise plutôt la formule :

$$C = \Delta\theta = 2 \times \pi - \sum_i \theta_i$$

2.3.4 Courbures de Voronoi

Les travaux de M. Meyer et al. [7] ont abouti à la mise au point de différentes méthodes de calcul de courbure en considérant un maillage comme un assemblage d'éléments de volumes finis. Pour déterminer la courbure en un point P , on fait intervenir un calcul de la moyenne des différentes cellules de Voronoi au voisinage de P .

Différents critères permettent d'évaluer la courbure en se basant sur ce principe :

- La normale au plan moyen :

$$K(X_i) = \frac{1}{2A} \sum_{j \in N_1(i)} (\cot \alpha_j + \cot \beta_j) (X_i - X_j)$$

avec

$$A_{\text{voronoi}} = \frac{1}{8} \sum_{j \in N_1(i)} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}) \|X_i - X_j\|^2$$

- La courbure gaussienne discrète :

$$K_G(X_i) = \left(2\pi - \sum_{j=1}^n \mathcal{G}_j \right) / A_{\text{voronoi}}$$

- Les courbures principales :

$$K_p(X) = K_H \pm \sqrt{\Delta(X)}$$

avec $K_H = \frac{1}{2} \|K(X)\|$ et $\Delta(X) = K_H^2 - K_G(X)$

2.3.5 Adaptation de la LPE par FAH à la 3D

Le calcul de courbure génère des valeurs décimales qu'il va falloir ramener dans une plage d'entiers de 0 à N. Pour ce faire, on utilise un algorithme de tri rapide "QuickSort" qui va classer les courbures par ordre croissant. Ensuite, il ne reste plus qu'à parcourir le tableau des courbures triées pour regrouper chaque ensemble de valeurs de courbure par paliers.

Une fois cette classification effectuée on peut utiliser l'index du palier du vertex dans la liste des paliers comme hauteur du relief de l'image d'entrée. Pour ce qui est de la labellisation, il suffit de prévoir un champ "label" au niveau de la structure des vertices et tout se passe alors de la même manière qu'en 2D.

Sur la figure suivante apparaît un modèle 3D avec sa courbure et les différentes régions segmentées avec la LPE par FAH sans biais :

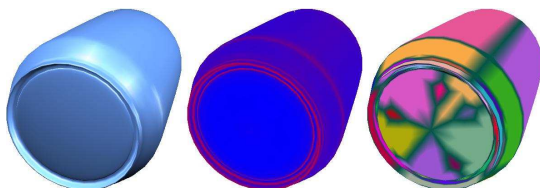


Figure 5 : Segmentation par LPE sans biais d'une canette

Les frontières vertes représentent la LPE du modèle. La segmentation obtenue est la LPE exacte du modèle selon le critère de courbure choisi.

On constate que, de même qu'en 2D, on obtient une sur-segmentation, ce qui n'est pas un problème pour le moment car notre but au final est d'utiliser un algorithme hiérarchique qui va avoir pour effet de l'éliminer. Par ailleurs, il existe des méthodes plus simples pour éliminer cette sur-segmentation. La plus robuste d'entre elles est certainement l'approche marqueurs dont voici un bref aperçu.

2.4 LPE par marqueurs

Afin de limiter le nombre de bassins, une technique consiste à marquer certaines régions de l'image d'entrée. Ces marqueurs vont définir les sources depuis lesquelles l'algorithme de la LPE va simuler la montée des eaux. Ainsi on aura une région par ensemble marqué et réciproquement. Afin d'éviter la création de bassins au niveau des minima locaux il est nécessaire d'effectuer une modification de l'homotopie de l'image d'entrée qui

consiste à combler les sous-bassins non marqués et à mettre les zones marquées au niveau le plus bas de l'image.

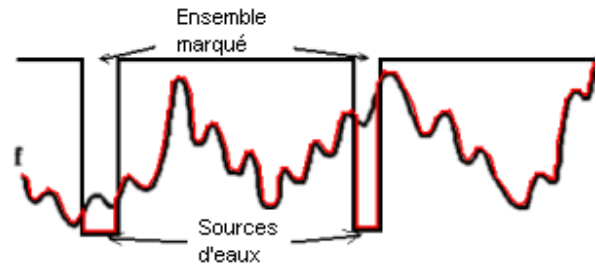


Figure 6 : Modification d'homotopie

Ainsi, les flots depuis les minima vont se propager sur les sous-bassins comblés, empêchant l'algorithme de LPE de générer d'autres régions que celles issues des marqueurs. Par ailleurs, lorsqu'on utilise la LPE par FAH, cette modification est réalisée à la volée en affectant à la pile de plus forte priorité les vertices marqués. L'algorithme est donc plus rapide que la LPE simple car il n'est même pas nécessaire d'effectuer une recherche des minima locaux.

Il est possible de définir ces marqueurs manuellement, en cliquant sur les zones clés du modèle.

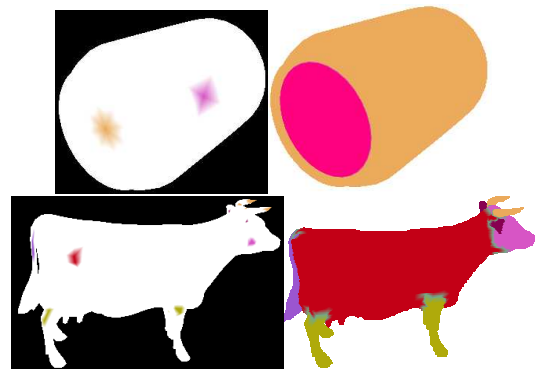


Figure 7 : Marqueurs et résultat de la LPE

Sur le modèle représenté dans la figure 7 en bas à gauche, 6 ensembles ont été marqués : la tête, les cornes, les oreilles, le corps, les jambes et la queue. En haut à gauche 2 marqueurs ont été placés. Les résultats de la LPE sur critère de courbure par covariance, présentés à droite, sont très satisfaisants. Cette technique fournit des caractéristiques très intéressantes en terme de qualité de segmentation, de robustesse et de temps de calcul, aussi bien sur des objets industriels que naturels. La plupart du temps, déplacer un marqueur de quelques vertices ne changera pas ou très peu le résultat final. De plus, l'utilisateur peut à sa guise affiner la segmentation en augmentant le nombre de faces marquées sur le modèle. Cependant, on peut admettre que la phase de définition manuelle des marqueurs rend cette méthode moins séduisante qu'une méthode qui serait capable de fournir d'aussi bons résultats, mais de manière automatique. C'est le but de l'approche hiérarchique que nous allons présenter dans la partie suivante.

3. Segmentation hiérarchique

3.1 Cascades

L'algorithme des cascades de S. Beucher [2] consiste à éliminer les bassins non significatifs de la segmentation en classant hiérarchiquement les différentes LPE.

Tout d'abord on effectue une LPE et on référence les différents bassins (1, 2, 3, ..., 9). Ensuite on fait monter les eaux depuis le minimum global numéroté 1. Une fois rempli ce dernier se déverse sur le bassin 2. On simule alors la montée des eaux depuis le minimum local du bassin 2 et on constate qu'il se déverse sur le bassin 1. Ce déversement mutuel entraîne une fusion des deux bassins.

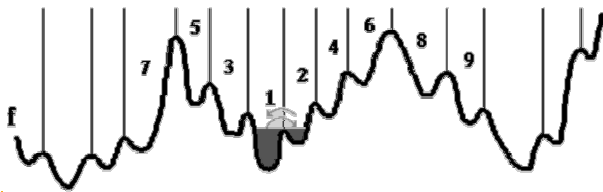


Figure 8 : Fusions des bassins 1 et 2

Cette fusion nous indique que la LPE entre les bassins 1 et 2 ne sera pas présente dans le niveau de hiérarchie supérieur. On la détruit pour pouvoir continuer à faire monter les eaux.

On continue de la même manière en fusionnant de proche en proche les bassins 3, 4, 5, 6 jusqu'à arriver à un point où le déversement n'est plus mutuel. En effet, la montée des eaux depuis le minimum issu du bassin 7 entraîne un débordement vers un bassin inférieur. La LPE entre 5 et 7 (de même qu'entre 6 et 8) est ainsi conservée, et fera partie du niveau hiérarchique supérieur.



Figure 9 : Conservation des LPE pour un déversement non mutuel

Pour pouvoir itérer l'algorithme et obtenir plusieurs niveaux de hiérarchie différents, deux techniques peuvent être utilisées : la modification d'homotopie et la LPE par graphe des points selles.

3.2 Modification d'homotopie

Entre deux itérations de l'algorithme des cascades, la modification d'homotopie est une technique qui modifie l'image d'entrée pour que le traitement par LPE ne détecte plus les lignes de segmentation de niveau inférieur. Pour cela, il suffit de "comblé" les sous bassins versants.

Sur le schéma ci-dessous, le niveau de l'image d'entrée résultant de la première itération est tracé en rouge. La montée des eaux sur les bassins transformés en plateaux aboutie à la LPE indiquée en bleu.

Dans le cas de la 3D, une modification de l'homotopie par la profondeur des bassins se révèle bien plus efficace que par la hauteur du point selle. Ce critère a été mis en avant dans les travaux de A. Mangan et R. Whitaker [5].



Figure 10 : Modification de l'homotopie de l'image d'entrée

La technique de modification d'homotopie nécessite une reconstruction de l'image d'entrée à chaque itération, ce qui rend le procédé coûteux en temps de calcul. De plus, on rencontre certains problèmes avec cette méthode en 3D lorsqu'on rencontre des zones de LPE larges de plus de 1 vertex, car ces dernières nécessitent plusieurs itérations pour pouvoir être éliminées. Ces « zones de partage » ont été décrites de façon complète par S. Beucher [3].

En éliminant plus rapidement les minima à l'origine des régions les plus petites, la spécification d'une taille minimale pour la création d'une région donne de meilleurs résultats. Voici un exemple comparatif, avec à gauche les résultats par modification d'homotopie simple sans seuillage, et à droite avec un seuillage de 20 vertices. Les deux résultats sont obtenus sur un critère de courbure par covariance.

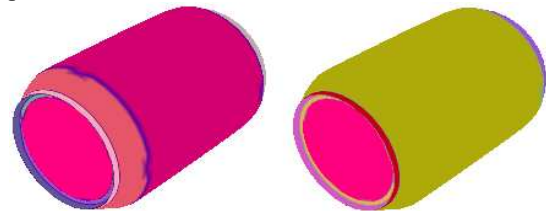


Figure 11 : 4^{ème} itération des cascades

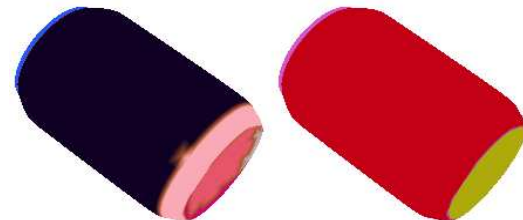


Figure 12 : 5^{ème} itération des cascades

On constate que, sans seuillage, un grand nombre de régions non significatives n'ont pas été effacées par la modification d'homotopie. En effet on récupère pour les 4^{ème} et 5^{ème} itérations respectivement 22 et 17 régions contre 7 et 5 lorsqu'on applique un seuillage de 20 vertices. L'expérience montre qu'un seuil de 10 vertices donne de bons résultats pour le cas de modèles de haute résolution.

L'influence de la méthode de calcul courbure est faible, voire négligeable pour des objets industriels. Cependant, il provoque certaines différences pour des objets naturels, ce qui permet de mettre en avant les méthodes de courbure les plus efficaces.

Les méthodes de courbure par la somme des angles, par la gaussienne et par la Kmin présentent des défauts flagrants (pattes arrières non détectées, régions non significatives conservées, etc.). On vérifiera pour d'autres modèles que les méthodes les plus pertinentes sont celles par covariance et par la courbure principale Kmax.

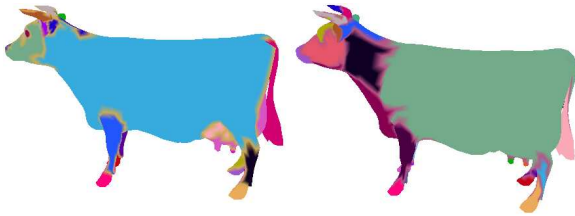


Figure 13 : Cascades - covariance et Cascades - Kmax

3.3 Graphe des points selles

Afin de ne pas avoir à reconstruire toute l'image à chaque itération des cascades il suffit de créer un graphe des points selles de la LPE de l'image d'entrée.

On part de l'image résultant de l'algorithme de la LPE. On référence les différents points selles entre deux régions connexes. Le graphe est construit à partir de ces points, en établissant une connexion entre deux d'entre eux dès lors qu'ils appartiennent à un bassin commun. On réitère l'opération « Graphe + LPE » jusqu'à ce qu'on ait atteint le niveau hiérarchique satisfaisant.

De même que pour la modification d'homotopie, on préférera utiliser la profondeur des bassins plutôt que la hauteur des points selles pour l'affectation de la hauteur du niveau des points du graphe.

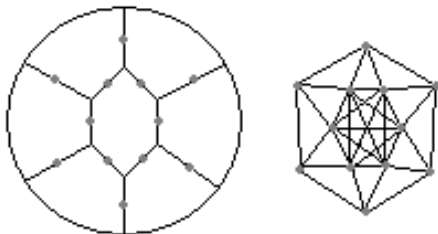


Figure 14 : Points selles de la LPE et graphe associé

En 2D, cette méthode est strictement équivalente à la modification d'homotopie, sauf qu'elle réduit de façon très nette la complexité des cascades dès la deuxième itération. En effet, les points selles étant les seuls points conservés, la taille de l'image d'entrée se trouve très nettement diminuée.

En 3D, cette méthode est plus exacte dans le sens où la largeur de la LPE n'est plus prise en compte. Le seul critère permettant d'établir une connexité entre deux points selles est celui du voisinage d'une région par rapport à une autre. La difficulté est alors de correctement détecter ce voisinage. D'autre part, puisque la largeur de la LPE n'influe plus sur l'application de l'algorithme pour l'itération suivante, une région doit forcément fusionner d'une itération à l'autre. De ce fait, le nombre d'itérations nécessaires devient beaucoup plus faible que par modification d'homotopie. Dans la figure 14, on part de la

LPE de base, qui fournit 346, puis on itère 3 fois le processus de reconstruction du graphe des points selles et LPE. Dès la 3ème itération on n'a plus que 4 régions présentes. En itérant une fois de plus, les régions sont toutes fusionnées.

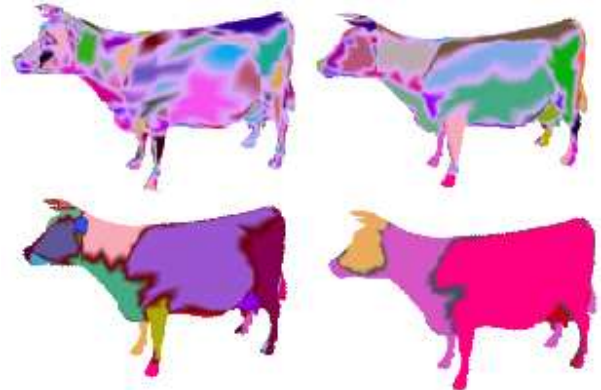


Figure 15 : Itération des cascades (346, 84, 23 puis 4 régions)

La segmentation est de meilleure qualité qu'en passant par une phase de modification d'homotopie car elle élimine les bassins non significatifs sans définir de valeur de seuil pour les filtrer. Cela en fait une méthode plus générique et plus robuste. Néanmoins, son principal inconvénient reste l'importante diminution du nombre de régions d'une itération à l'autre, diminution telle qu'une région significative peut facilement être fusionnée donnant lieu à un résultat trop grossier, contenant soit trop, soit trop peu de régions. Pour pouvoir obtenir un nombre précis de régions, il faut passer par une méthode hybride présentée dans la partie suivante.

3.4 Approche combinée Cascades/Fusions

D'une itération à l'autre, l'algorithme des cascades par graphe fusionne trop de régions. C'est pourquoi il serait judicieux, par un critère de nombre de régions, d'arrêter d'itérer, puis d'appliquer un algorithme de fusions successives permettant d'obtenir le nombre voulu exact de régions significatives.

L'algorithme par Interactive Watershed Transform de H. Hahn et al. [8] est intéressant en ce sens, car il crée une arborescence décrivant de façon hiérarchique l'ordre selon lequel les points selles (ou points de fusions) doivent opérer une fusion de bassins. Cet algorithme fonctionne sur un critère de hauteur depuis les régions fournies par la LPE de l'image d'entrée.

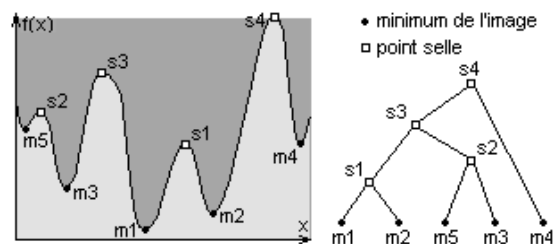


Figure 16 : Arbre de fusions de Hahn [8]

Pour une segmentation plus performante, nous proposons un algorithme combinant les cascades et une technique de fusions hiérarchiques sur un critère de profondeur des points selles. L'algorithme hybride va tout d'abord effectuer les cascades jusqu'à n'obtenir qu'une seule région. Ensuite il va créer un arbre référençant pour chaque niveau des cascades les points selles du graphe correspondant, depuis les premiers points selles de la LPE de l'image d'entrée jusqu'au point selle réalisant la fusion finale de l'image. Chaque point selle S_i de courbure C est ainsi évalué au niveau de sa profondeur P , avec :

$$P(S_i(R_a, R_b)) = C(S_i) - \text{Min}(R_a, R_b)$$

Ce critère définit la position du point selle dans la hiérarchie de son niveau de cascade.

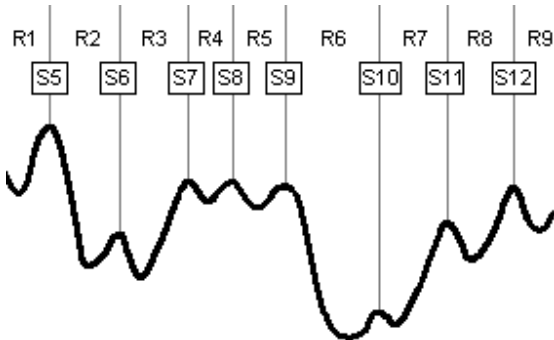


Figure 17 : Indexation des points selles de l'image

Sur la figure ci-dessus une image a été segmentée par une LPE (9 régions) et les points selles ont été indexés (S5 à S12). La profondeur des points selles est calculée, on classe les points selles dans l'ordre croissant (S8, S10, S6, S7, S12, S11, S9) puis on reconstruit l'image (figure ci-dessous). Les minima locaux sont représentés en gris rayé (S6, S8 et S10).

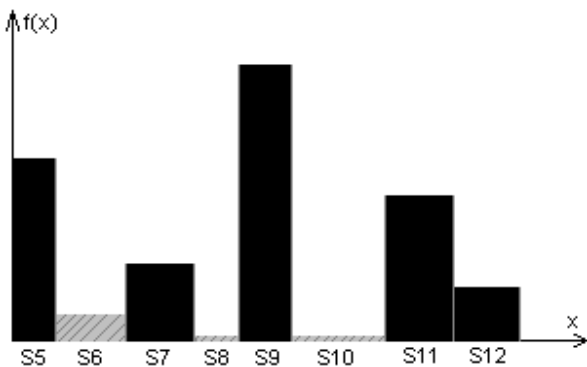


Figure 18 : Première reconstruction de l'image

Les points selles sont à nouveau indexés. Dans le cas présent, une fois la LPE appliquée il reste S5, S9 et S11. Ces trois points selles sont copiés, renommés (S2, S3, S4) et réévalués par rapport à leur nouvelle profondeur et sont ainsi placés au niveau hiérarchique supérieur. L'itération suivante entraîne la fusion totale.

L'ensemble du processus des cascades peut être représenté sous forme d'un arbre où chaque noeud parent correspond à l'opération de fusion des noeuds fils. En 3D, une région

possède un nombre variable de points selles. Dans la figure 19 est représenté l'arbre de segmentation correspondant à l'image de la figure 17.

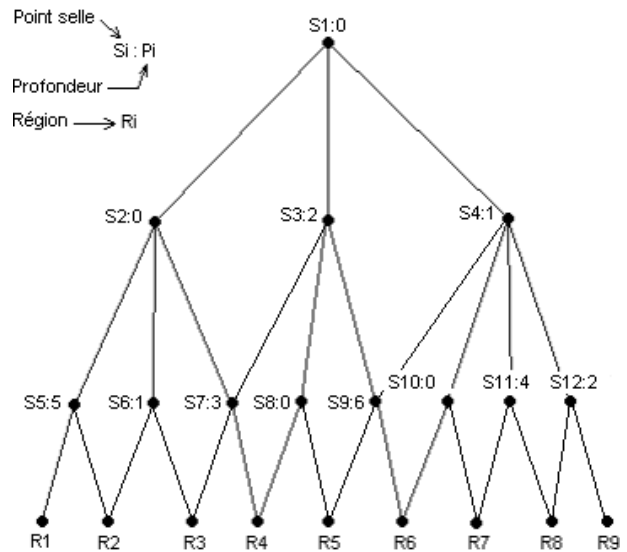


Figure 19 : Arbre des cascades

Une fois l'arbre construit, on sélectionne le niveau optimal de l'arbre par rapport au nombre de régions souhaitées pour la segmentation du modèle. Le niveau retenu est celui qui possèdera le nombre de régions le plus proche tout en étant supérieur, afin que l'étape de fusion réduise ce nombre jusqu'à la segmentation souhaitée.

Cette dernière étape consiste à hiérarchiser les points selles du niveau adéquat de l'arbre, et à appliquer ces fusions jusqu'à obtenir le nombre de régions requises. La hiérarchisation est basée sur le critère des profondeurs croissantes C_i des points selles de l'arbre. Pour chaque point selle traité, la fusion correspondante est effectuée en affectant aux feuilles issues du point selle dans l'arbre un label commun. Dans le cas de l'image 2D que nous traitons, le nombre de noeuds parents d'un point selle est limité à 2, mais il faut savoir qu'en 3D ce nombre peut être supérieur. Il faut donc gérer le conflit d'affectation de labels de 2 parents sur un même fils. Pour cela, on empêche à toute feuille labellisée d'être parcourue par la suite. De ce fait la première fusion effectuée est prioritaire sur les suivantes.

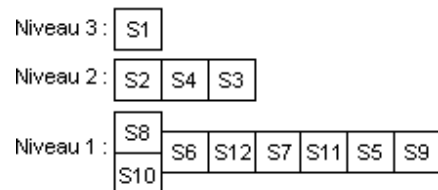


Figure 20 : Piles des priorités de fusions

Un organigramme (figure 21) résume les principales étapes de l'algorithme. Quelques exemples de résultats obtenus sont présentés figures 22 et 23.

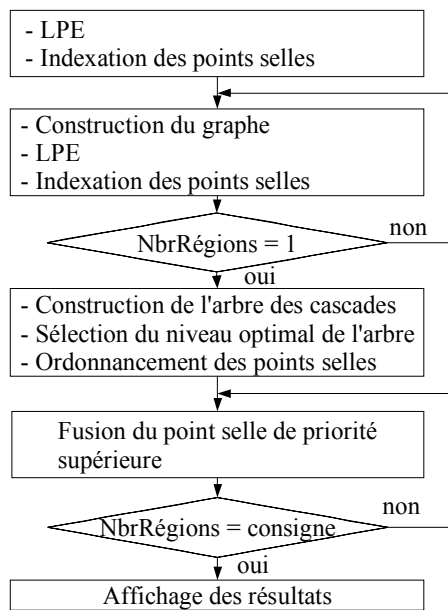


Figure 21 : Algorithme hybride cascades/fusions

Le temps de calcul de cet algorithme est plus grand que celui des cascades, puisqu'il effectue en plus une opération de fusion. Cependant, une fois les cascades effectuées, le processus de segmentation peut être réitéré avec un choix de nombre de régions différent en partant de l'étape "Sélection du niveau optimal de l'arbre", ce qui permet un certain confort lorsqu'on cherche la segmentation la plus satisfaisante.

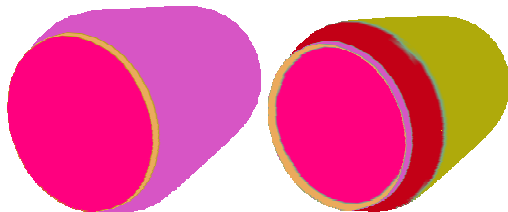


Figure 22 : 5 régions à gauche, 8 régions à droite



Figure 23 : 20 régions à gauche, 50 régions à droite

4. Conclusion

La nouvelle méthode de segmentation hiérarchique que nous proposons combine l'algorithme des cascades de S. Beucher et un algorithme de fusions hiérarchisées. Il permet, à partir du nombre de régions souhaitées, d'effectuer le nombre d'itérations optimal des cascades, puis de fusionner les régions ainsi obtenues de manière hiérarchisée. Basé sur l'algorithme de LPE par FAH sans

biais, il fournit une segmentation rapide, robuste et de bonne qualité.

La limite de cet algorithme reste bien entendu la présence d'un paramètre à spécifier. Cependant, il est très bien adapté aux problématiques industrielles pour lesquelles, dans bien des cas, l'utilisateur a une idée du nombre de régions nécessaires pour caractériser un modèle donné. De ce fait, cet algorithme ainsi que l'algorithme de segmentation par marqueurs feront partie des outils de C.A.O d'un logiciel de SPC-Software, une société de colorimétrie située à Salbris (Loir et Cher - France) qui fournit des services de contrôle qualité sur la couleur des pigments métallisés de ses clients (grands groupes des industries cosmétiques, peinture automobile,...). Les techniques de segmentation présentées dans cet article permettront aux utilisateurs d'extraire de manière très simple les parties homogènes de leurs modèles 3D surfaciques, et ainsi d'effectuer des simulations de teintes à effet en appliquant une texture différente sur chaque partie segmentée.

Bibliographie

- [1] H. Digabel et al., Iterative Algorithm. In *Quantitative analysis of microstructures in materials sciences* (J.-L. Chermant, biology and medicine, Stuttgart, 1978), 85-99.
- [2] S. Beucher, Watershed, Hierarchical Segmentation and Waterfall Algorithm. *Proc. Mathematical Morphology and its Applications to Image Processing*, Fontainebleau, France, 1994, 69-76.
- [3] S. Beucher, *Unbiased Implementation of the Watershed Transformation based on Hierarchical Queues*. CMM Internal note, Paris School of Mines, 2004.
- [4] L. Vincent et al., Watershed in Digital Spaces, an Efficient Algorithm based on Immersion Simulation. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6), 1991, 563-598.
- [5] A. Mangan et al., Partitioning 3D Surface Meshes Using Watershed Segmentation. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 5(4), 1999, 308-321.
- [6] T. Srinark et al., A Novel Method for 3D Surface Mesh Segmentation. *6th IASTED International Conf. on Computer Graphics and Imaging*, Honolulu, 2003, 13-15.
- [7] M. Meyer et al., Intrinsic Parameterization of Surface Meshes. *Computer Graphics Forum*, 21(3), 2002, 209-218.
- [8] Y. Sun et al., Triangle Mesh-Based Edge Detection and its Application to Surface Segmentation and Adaptive Surface Smoothing. *IEEE International Conference on Image Processing*, New-York, 3, 2002, 825-828.
- [9] H. Hahn et al., IWT-Interactive Watershed Transform: a Hierarchical Method for Efficient Interactive and Automated Segmentation of Multidimensional Greyscale image. *Proc. Medical Imaging*, San Diego, 2003.