

**THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TOURS**

Discipline : **Informatique**

présentée et soutenue publiquement

par :

**Sébastien DELEST**

le 26 novembre 2007

**Segmentation de maillages 3D à l'aide de  
méthodes basées sur la ligne de partage des eaux**

---

Directeur de thèse : Hubert CARDOT

Co-encadrant : Romuald BONÉ

---

JURY :

BASKURT Atilla	Professeur	Rapporteur	INSA de Lyon
BONÉ Romuald	Maître de conférences	Examineur	Université François Rabelais Tours
CARDOT Hubert	Professeur	Examineur	Université François Rabelais Tours
DANIEL Marc	Professeur	Président	Université de la Méditerranée 2
PRÊTEUX Françoise	Professeur	Rapporteur	INT Evry







## Remerciements

J'ai toujours eu une forte attirance pour le domaine de la 3D et réaliser une thèse sur cette thématique est quelque chose que je n'aurais même pas espérée il y a quelques années.

Je tiens à remercier Pascal Makris, mon encadrant de DEA, pour avoir su me motiver et m'encourager à prendre une direction orientée vers la recherche.

Je remercie Romuald Boné et Hubert Cardot, pour l'encadrement de qualité et les nombreux conseils qu'ils m'ont apportés tout au long de la thèse. Nos différents échanges ont été très formateur et je souhaiterais les remercier pour la disponibilité dont ils ont fait preuve ainsi que les moyens mis à ma disposition pour réaliser ma recherche et mes publications.

Cette thèse a connu à son commencement des difficultés financières. Je remercie mes encadrants, la direction du labo et l'équipe HaNT qui ont pu trouver une solution à ce problème.

Je tiens à remercier Atilla Baskurt, Françoise Prêteux et Marc Daniel pour avoir accepté d'être rapporteur et examinateur de ma thèse. Leur présence dans mon jury de thèse est un réel honneur pour moi.

Je remercie les étudiants avec qui j'ai eu la possibilité de travailler sur ma thématique de thèse. Les travaux menés ensemble m'ont beaucoup aidé et ont parfois conduit à des publications.

Je remercie mes amis, mes collègues de l'équipe RFAI et plus généralement du Laboratoire Informatique. La liste serait longue pour remercier les doctorants avec qui j'ai eu le plaisir de travailler ou tout simplement partager des moments agréables. Je citerais quand même Ali, les deux Julien, Rashid, Ludo, David, Stef, Alain, Nicho, Lamia, etc.

Je remercie également les membres de ma famille pour leurs encouragements et leur soutien. Ce travail leur est dédié.



# Table des matières

Table des matières	ix
Liste des tableaux	xii
Table des figures	xvi
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 État de l'art de la segmentation de maillages polygonaux</b>	<b>5</b>
2.1 Notions fondamentales sur les maillages polygonaux . . . . .	6
2.1.1 Applications . . . . .	6
2.1.2 Les types de maillages polygonaux . . . . .	7
2.2 Problématique de segmentation . . . . .	12
2.2.1 Contraintes et critères de partitionnement . . . . .	14
2.2.2 Évaluation de la segmentation . . . . .	16
2.3 La segmentation en carreaux surfaciques . . . . .	19
2.3.1 La croissance de régions . . . . .	24
2.3.2 La ligne de partage des eaux . . . . .	30
2.3.3 Partitionnement hiérarchique . . . . .	36
2.3.4 Partitionnement itératif . . . . .	42
2.3.5 Analyse spectrale . . . . .	50
2.3.6 Les modèles déformables . . . . .	52
2.3.7 Autres approches . . . . .	54
2.4 La segmentation en parties significatives . . . . .	56
2.4.1 La loi des minima . . . . .	58
2.4.2 Décomposition en parties convexes . . . . .	61
2.4.3 Points critiques et protrusions . . . . .	64
2.4.4 Descripteurs de forme multi-échelles . . . . .	68
2.4.5 Extraction du squelette . . . . .	69
2.4.6 Les graphes de Reeb . . . . .	72
2.4.7 Autres méthodes . . . . .	74
2.5 Bilan et approche proposée . . . . .	76

<b>3</b>	<b>Segmentation par ligne de partage des eaux</b>	<b>79</b>
3.1	Principe de la ligne de partage des eaux . . . . .	79
3.2	Les différentes mises en œuvre . . . . .	84
3.2.1	La LPE par immersion . . . . .	84
3.2.2	La LPE par distance topographique . . . . .	87
3.3	La sur-segmentation . . . . .	89
3.3.1	La LPE contrainte par les marqueurs . . . . .	90
3.3.2	Segmentation hiérarchique et cascades . . . . .	92
3.3.3	La LPE contrainte par les dynamiques des minima . . . . .	98
3.4	La LPE sur les maillages polygonaux . . . . .	103
<b>4</b>	<b>La fonction de hauteur</b>	<b>111</b>
4.1	La notion de <i>hauteur</i> sur les image 2D . . . . .	111
4.2	Les méthodes de calcul de courbure . . . . .	113
4.3	La distance aux lignes de crêtes . . . . .	122
<b>5</b>	<b>Les stratégies pour éviter la sur-segmentation</b>	<b>129</b>
5.1	La segmentation hiérarchique de maillages à l'aide de la LPE . . . . .	130
5.1.1	La profondeur de la LPE . . . . .	131
5.1.2	Les cascades . . . . .	133
5.1.3	Les dynamiques de contour . . . . .	135
5.1.4	Les paramètres . . . . .	138
5.2	La génération automatique de marqueurs pour la LPE 3D . . . . .	139
5.2.1	La voxelisation . . . . .	140
5.2.2	La squelettisation . . . . .	144
5.2.3	Le marquage . . . . .	150
5.2.4	Les paramètres . . . . .	152
<b>6</b>	<b>Résultats expérimentaux</b>	<b>155</b>
6.1	Évaluation des fonctions de hauteur de la LPE 3D . . . . .	155
6.2	Évaluation de la segmentation hiérarchique . . . . .	161
6.3	Évaluation de la segmentation réalisée à l'aide de marqueurs générés par squelettisation . . . . .	166
6.4	Comparaison des méthodes de segmentation . . . . .	171
6.5	Bilan sur les méthodes de segmentation proposées . . . . .	174
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>177</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>206</b>
<b>A</b>	<b>Construction hiérarchique des partitions</b>	<b>207</b>
A.1	Fusion à partir de la profondeur de la LPE . . . . .	207

A.2 Fusion à partir des cascades . . . . .	209
A.3 Combinaison des cascades et de la profondeur de la LPE . . . . .	212
A.4 Fusion à partir des dynamiques de contour . . . . .	214
<b>B La squelettisation</b>	<b>217</b>
<b>C Modèles 3D utilisés</b>	<b>221</b>
<b>Index</b>	<b>223</b>
<b>Index des auteurs cités</b>	<b>225</b>



# Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques et critères des méthodes de croissance de régions. . . . .	30
2.2	Caractéristiques et critères des méthodes de LPE. . . . .	36
2.3	Caractéristiques et critères des méthodes de partitionnement hiérarchique.	41
2.4	Caractéristiques et critères des méthodes de partitionnement itératif. . .	49
2.5	Caractéristiques et critères des méthodes de partitionnement à partir de l'analyse spectrale. . . . .	52
2.6	Caractéristiques et critères des méthodes basées sur les modèles défor- mables. . . . .	54
2.7	Caractéristiques et critères des autres méthodes. . . . .	56
2.8	Caractéristiques et critères des méthodes de décomposition en parties convexes. . . . .	64
2.9	Caractéristiques et critères des méthodes basées sur les points critiques et protrusion. . . . .	68
2.10	Caractéristiques et critères des méthodes basées sur les descripteurs de forme multi-échelles. . . . .	69
2.11	Caractéristiques et critères des méthodes utilisant le squelette de la forme.	72
2.12	Caractéristiques et critères des méthodes utilisant les graphes de Reeb.	74
2.13	Caractéristiques et critères des autres méthodes de segmentation en par- ties significatives. . . . .	76
2.14	Méthodes et caractéristiques généralement utilisées pour les applications.	77
5.1	Nombre de niveaux selon la fonction de hauteur utilisée . . . . .	132
5.2	Segmentations de plusieurs modèles réalisées à partir des cascades. . . . .	134
5.3	Segmentations de plusieurs modèles réalisées à partir des cascades et des dynamiques de contour. . . . .	136
6.1	Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur le modèle <i>Fandisk</i> . . . . .	157
6.2	Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur le modèle <i>Moaï</i> . . . . .	158
6.3	Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur le modèle <i>Mannequin</i> . . . . .	158

6.4	Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur les modèles de type <i>visage</i> . . . . .	161
6.5	Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur les modèles de type <i>pièce mécanique</i> . . . . .	162
6.6	Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur les modèles de type <i>animal</i> . . . . .	163
6.7	Caractéristiques des segmentations obtenues à partir de la LPE et des marqueurs générés par squelettisation. . . . .	168
B.1	Listes <i>S26</i> des prédécesseurs <i>26-connectés</i> . . . . .	218
B.2	Liste <i>S18</i> des prédécesseurs <i>6-connectés</i> . . . . .	219
B.3	Liste <i>N18</i> contenant l'ordre de parcours des points. . . . .	219
C.1	Nom des modèles 3D et leur créateur (s'ils sont disponibles) . . . . .	222

# Table des figures

2.1	Le modèle David représenté à l'aide de triangles, de quadrilatères et de simplexes. . . . .	7
2.2	Régularité du maillage. . . . .	8
2.3	Maillage irrégulier et maillage semi-régulier. . . . .	9
2.4	Maillages conformes et non-conformes. . . . .	9
2.5	Triangles Delaunay et non-Delaunay. . . . .	10
2.6	Création d'un maillage à partir de la triangulation de Delaunay. . . . .	10
2.7	Célèbres surfaces non-orientables. . . . .	11
2.8	Du maillage primal au maillage dual. . . . .	12
2.9	Les huit types fondamentaux de surface. . . . .	28
2.10	Minimum et plateaux. . . . .	30
2.11	Deux approches de la ligne de partage des eaux. . . . .	32
2.12	La profondeur de la LPE. . . . .	32
2.13	Le biais d'orientation. . . . .	38
2.14	Contraction d'une arête du graphe dual du maillage. . . . .	38
2.15	Un graphe et sa représentation spectrale. . . . .	51
2.16	L'escalier de Schroder. . . . .	58
2.17	Forme en coude montrant plusieurs segmentations possibles. . . . .	58
2.18	Lignes de fortes et de faibles courbures. . . . .	59
2.19	Cas où la courbure gaussienne sera nulle sur toute la surface. . . . .	59
2.20	Limitation de la loi des minima. . . . .	61
2.21	Une autre limitation de la loi des minima. . . . .	61
2.22	Décomposition d'un modèle en carreaux surfaciques convexes et non convexes. . . . .	62
2.23	Classification des vertex par rapport à la distance géodésique. . . . .	65
2.24	Un tore associé à la fonction de hauteur $f(x, y, z) = z$ et son graphe de Reeb. . . . .	73
3.1	Relief d'une image généré à partir des niveaux de gris . . . . .	80
3.2	Exemple monodimensionnel d'un relief composé de bassins versants, de crêtes et de minima. . . . .	80
3.3	Les trois relations d'inclusion possibles entre $Z$ et $Z \cap Z_{i_0}(f)$ . . . . .	81

3.4	La distance géodésique. . . . .	82
3.5	Zones d'influence géodésiques. . . . .	82
3.6	Exemple de LPE par inondation. . . . .	83
3.7	LPE par immersion sur une grille d'éléments 4-connectés. . . . .	85
3.8	File d'attente FIFO pour le traitement des pixels de niveau $h$ . . . . .	85
3.9	Création du graphe des ensembles. . . . .	86
3.10	Création de la LPE à partir du graphe des ensembles. . . . .	87
3.11	Fonctionnement d'une file d'attente hiérarchique. . . . .	88
3.12	Exemples monodimensionnels de la LPE par minima et par marqueurs. . . . .	91
3.13	LPE contrainte par les marqueurs. . . . .	91
3.14	Segmentation de « grains de café » à partir de marqueurs issus de la fonction de distance. . . . .	92
3.15	Principe de construction d'une image mosaïque. . . . .	92
3.16	Exemple de construction d'une image mosaïque. . . . .	94
3.17	Exemple de graphe associé à une image mosaïque. . . . .	95
3.18	Caractérisation de marqueurs significatifs. . . . .	95
3.19	Reconstruction géodésique pour la détection de marqueurs. . . . .	96
3.20	Segmentation hiérarchique à partir des cascades basées sur les graphes. . . . .	97
3.21	Dynamique d'un minimum. . . . .	98
3.22	Calcul de la dynamique des minima. . . . .	100
3.23	Calcul des dynamiques des minima à partir du procédé d'inondation. . . . .	101
3.24	Calcul des dynamiques de contour. . . . .	102
3.25	Exemple de relations de voisinage sur différents types de structures. . . . .	103
3.26	Modèles 3D segmentés à partir de la LPE. . . . .	106
3.27	Illustration de la construction de la LPE par FAH. . . . .	109
4.1	Comparaison des fonctions de hauteur. . . . .	112
4.2	Illustration des courbures principales. . . . .	114
4.3	Régions locales. . . . .	115
4.4	Calcul de l'aire de Voronoï. . . . .	117
4.5	Calcul de la courbure à partir des normales des faces voisines. . . . .	119
4.6	Illustration de différentes courbures sur une forme de type selle. . . . .	120
4.7	Carte des distances aux lignes de crêtes. . . . .	126
4.8	Dépliage local du maillage. . . . .	126
4.9	Sur-segmentation de la LPE sur le modèle <i>Moaï</i> . . . . .	127
5.1	Les différentes étapes de la segmentation hiérarchique. . . . .	130
5.2	Création de l'arbre de fusion à partir de la profondeur de la LPE. . . . .	131
5.3	Différents seuils de la profondeur de la LPE. . . . .	132
5.4	Segmentation à partir des cascades. . . . .	133
5.5	Segmentation à partir des cascades et de la profondeur de la LPE. . . . .	135

5.6	Niveaux de segmentation générés à partir des méthodes de fusion. . . . .	137
5.7	Segmentation à partir des cascades et des dynamiques de contour. . . . .	138
5.8	Sélection du niveau de segmentation. . . . .	139
5.9	La génération automatique de marqueurs pour la LPE 3D. . . . .	140
5.10	Les six <i>Z-buffers</i> . . . . .	141
5.11	Image de profondeur des six plans. . . . .	142
5.12	Matrice contenant les couples d'entrée / sortie $\{e_i, s_i\}$ dans l'objet. . . . .	142
5.13	Voxelisation d'un objet 3D. . . . .	143
5.14	Limites de la méthode de [Karabassi <i>et al.</i> , 1999]. . . . .	143
5.15	Ensembles et numéros des points dans $N_{26}(p) \setminus \{p\}$ . . . . .	145
5.16	Différentes itérations du procédé de squelettisation. . . . .	150
5.17	Résumé des étapes de la segmentation par LPE avec des marqueurs générés automatiquement à partir du squelette de l'objet. . . . .	151
5.18	Création de liens entre les faces et les voxels du squelette. . . . .	152
6.1	Comparaison des fonctions de hauteur et des segmentations sur le modèle <i>Fandisk</i> . . . . .	156
6.2	Comparaison des fonctions de hauteur et des segmentations sur le modèle <i>Moaï</i> . . . . .	159
6.3	Comparaison des fonctions de hauteur et des segmentations sur le modèle <i>Mannequin</i> . . . . .	160
6.4	Segmentation hiérarchique sur des modèles de type <i>visage</i> . . . . .	161
6.5	Segmentation hiérarchique sur des modèles de type <i>pièce mécanique</i> . . . . .	162
6.6	Segmentation hiérarchique sur des modèles de type « animal ». . . . .	163
6.7	Segmentations à partir de la LPE et des marqueurs générés par squelettisation. . . . .	167
6.8	Segmentation à partir de la LPE et des marqueurs générés par squelettisation. . . . .	168
6.9	Segmentation hiérarchique du modèle <i>Dinopet</i> . . . . .	169
6.10	Squelettes générés à partir de différentes résolutions de voxelisation. . . . .	169
6.11	Sensibilité à la pose. . . . .	170
6.12	Comparaison des méthodes de segmentation sur le modèle <i>Octopus</i> . . . . .	172
6.13	Comparaison des méthodes de segmentation sur le modèle <i>Dinosaur</i> . . . . .	172
6.14	Comparaison des méthodes de segmentation sur le modèle <i>Bird</i> . . . . .	173
6.15	Comparaison des méthodes de segmentation sur le modèle <i>Homer</i> . . . . .	173
6.16	Comparaison des méthodes de segmentation sur le modèle <i>Santa</i> . . . . .	174
7.1	Segmentation par LPE avec une fonction de distance relative aux points critiques de type <i>selle</i> . . . . .	179
7.2	Suppression des segments non significatifs du squelette à partir des extrema. . . . .	181
7.3	Recherche du graphe sémantique équivalent au squelette de l'objet 3D. . . . .	182

A.1	Arbre de fusion pour la profondeur de la LPE. . . . .	207
A.2	Partitions à chaque itération de la fusion. . . . .	208
A.3	Suite du processus de fusion à partir de la profondeur de la LPE. . . . .	209
A.4	Création de l'arbre de poids minimum. . . . .	210
A.5	Segmentation hiérarchique à partir des cascades. . . . .	211
A.6	Création de l'arbre de poids minimum. . . . .	212
A.7	Segmentation hiérarchique à partir des cascades avec le critère de profondeur de LPE. . . . .	213
A.8	Création des dynamiques de contour. . . . .	214
A.8	Création des dynamiques de contour. . . . .	215
A.9	Seuillage des dynamiques de contour. . . . .	216
C.1	Modèles 3D utilisés dans cette thèse. . . . .	221

# Chapitre 1

## Introduction

Les domaines de l'informatique et des télécommunications sont en constante évolution et ont connu des avancées technologiques majeures ces quinze dernières années. Le matériel informatique et les données numériques ont évolué parallèlement, faisant apparaître de nouveaux besoins et de nouvelles applications. Les données tridimensionnelles (3D) constituent actuellement un contenu multimédia émergeant. La représentation tridimensionnelle d'objet est utilisée dans des applications de plus en plus nombreuses, notamment la médecine, la cartographie, la conception assistée par ordinateur, la simulation, les jeux vidéo, le cinéma, etc.

Nous traitons dans cette thèse de la segmentation de maillages polygonaux. Il existe différents types de modélisation tridimensionnelle ; les maillages polygonaux font partie de la modélisation surfacique. Ce type de représentation est un des plus répandus et intervient dans des applications comme la représentation d'une scène visuelle, la modélisation d'environnements réels ou virtuels, l'animation et la navigation temps réel, etc. La segmentation de maillages polygonaux est un outil nécessaire à de nombreuses applications. Ces dernières années, un nombre important de méthodes a été proposé, offrant des approches et des critères de segmentation différents. Certains travaux ont permis d'établir une classification parmi les méthodes de segmentations développées. Deux principaux types de segmentations de maillages polygonaux apparaissent dans la littérature : la segmentation en carreaux surfaciques et la segmentation en parties significatives. La première approche correspond à la segmentation du maillage suivant des contraintes géométriques telles que la courbure, la planéité, etc. La deuxième approche a pour but d'identifier les parties significatives du maillage et de réaliser la décomposition en tenant compte d'informations d'ordre sémantique. Nous étudions au chapitre suivant les méthodes et critères proposés ces dernières années pour ces deux types de segmentation. L'état de l'art que nous proposons se veut plutôt exhaustif par rapport

aux méthodes apparues récemment. Pour situer notre travail, nous avons suivi la logique d'étude et de comparaison des méthodes de segmentation de [Shamir, 2004], de [Agathos *et al.*, 2007] et de [Attene *et al.*, 2006b].

Il existe une large variété de méthodes de segmentation adaptées à des problématiques assez différentes. Nos travaux s'appuient sur la ligne de partage des eaux (LPE). [Mangan et Whitaker, 1999] ont montré le potentiel de la LPE pour segmenter les maillages polygonaux et ont ouvert la voie à de nombreux travaux. La LPE nécessite une fonction de hauteur ainsi qu'un traitement supplémentaire pour corriger la sur-segmentation qu'elle génère. Nous proposons à la suite de l'état de l'art, des chapitres consacrés à la LPE, à la fonction de hauteur ainsi qu'aux procédés que nous avons utilisés pour éviter la sur-segmentation. Nos recherches ont permis l'élaboration de deux nouvelles fonctions de hauteur et de deux approches basées sur la segmentation hiérarchiques et la création de marqueurs générés automatiquement pour éviter la sur-segmentation.

La LPE utilise une structure d'éléments connectés. Il peut s'agir de maillages, d'images 2D ou 3D composés respectivement de vertex, de pixels ou de voxels connectés. La structure est interprétée comme un relief où la hauteur est définie à partir d'une intensité associée à chaque élément. Cette intensité correspond à la fonction de hauteur nécessaire à la LPE. Dans le cas des images 2D, elle est souvent associée aux niveaux de gris ou au gradient. La plupart des méthodes de segmentation de maillages polygonaux utilisent la courbure comme fonction de hauteur. Cette fonction est l'élément clé du procédé de segmentation et de nombreuses pistes restent encore à explorer. Nous avons élaboré une fonction basée sur la courbure d'une face pour un procédé de LPE évoluant sur une structure de faces connectées. Cette approche permet de caractériser la courbure à un niveau moins local que dans le cas d'un vertex et offre de bons résultats de segmentation. Nous avons également proposé une fonction basée sur la distance aux lignes caractéristiques du maillage. Ces lignes apparaissent comme les contours potentiels des différentes régions du modèle. La fonction que nous avons développée permet à la LPE de fermer naturellement ces lignes.

La LPE utilisée seule ne permet pas une segmentation cohérente; elle nécessite des stratégies complémentaires pour supprimer la sur-segmentation. Nous avons orienté nos travaux selon deux approches : la segmentation hiérarchique et la LPE avec marqueurs. Ces deux stratégies n'ont été que très peu étudiées dans le cadre de la segmentation de maillages polygonaux. De nombreuses méthodes ont été développées pour les images 2D, nous nous sommes intéressés aux possibilités d'adapter des méthodes qui ont fait leur preuve sur les images à la problématique des maillages polygonaux. Nous avons retenu le procédé des cascades de [Beucher, 1994] et mis au point une méthode qui permet la création de plusieurs niveaux de segmentation en offrant la possibilité à l'utilisateur de

les visionner rapidement pour choisir le niveau adapté à son application. Nous avons également proposé une méthode basée sur la génération automatique de marqueurs à partir de la squelettisation de l'objet. Les objets 3D de type *animal*, *humanoïde* ou *tubulaire* disposent d'un squelette qui contient des informations topologiques importantes pour la segmentation en parties significatives. Nous avons développé une méthode d'amin-cissement topologique pour extraire le squelette et définir des marqueurs à partir des différentes parties du squelette. Les marqueurs sont ainsi positionnés sur des parties significatives de la surface et vont permettre à la LPE de finaliser la segmentation. La LPE ainsi qu'une fonction de hauteur relative à la courbure sont utilisées pour établir les frontières aux zones de fortes courbures qui correspondent généralement à des jonctions de parties.

Nous présentons au prochain chapitre un état de l'art sur la segmentation de maillages polygonaux. Nous discutons de la LPE mais également de nombreux autres types de méthodes et de critères utilisés dans le cadre de la segmentation de maillages polygonaux. Nous discutons au chapitre 3 de la LPE et de son adaptation aux maillages polygonaux. Au chapitre 4, nous abordons plusieurs fonctions de hauteur pour la LPE basées notamment sur la courbure et la distance aux lignes de crête. Nous présentons au chapitre 5 plusieurs stratégies pour éviter la sur-segmentation générée par la LPE. Les résultats de nos expérimentations sont proposés au chapitre 6. La conclusion ainsi que les nombreuses perspectives de nos travaux apparaissent au chapitre 7.



## Chapitre 2

# État de l'art de la segmentation de maillages polygonaux

La segmentation de maillages polygonaux est un thème de recherche assez récent. Les applications sont nombreuses et font intervenir deux principales approches de segmentations [Shamir, 2004]; il s'agit de la segmentation en carreaux surfaciques (*patches surfaciques*) et de la segmentation en parties significatives.

La segmentation en carreaux surfaciques se distingue par la création de petites régions (carreaux) qui peuvent obéir à certaines propriétés géométriques telles que la taille, la planéité, la convexité ou bien qui sont délimitées par des frontières de courbure plus ou moins fortes. Les carreaux déterminés pourront alors intervenir dans la simplification ou la compression d'un objet par exemple.

La segmentation en parties significatives s'appuie sur la notion de sémantique. Les parties identifiées peuvent se révéler pertinentes pour des applications telles que l'indexation, la reconnaissance de formes, l'animation, etc.

Ce chapitre traite des différentes méthodes de segmentation de maillages polygonaux et des principaux outils utilisés dans nos travaux. Les notions fondamentales sur les maillages polygonaux sont présentées puis la problématique de segmentation est exposée. Nous discutons ensuite des deux types de segmentation et détaillons pour chacune d'elles les différentes méthodes et applications afférentes. Nous concluons cette partie avec un résumé des principaux points abordés et présentons les solutions que nous avons développées.

## 2.1 Notions fondamentales sur les maillages polygonaux

Les applications en rapport avec les maillages polygonaux ont pris une place de plus en plus importante ces dernières années. Les maillages, dans le cas général, tiennent une position prédominante parmi les différents modes de représentation informatique d'objets géométriques. Un modèle géométrique est la représentation numérique d'un objet spatial. Il existe plusieurs approches de modélisation tridimensionnelle : la modélisation filaire, la modélisation surfacique et la modélisation volumique.

La modélisation filaire est le premier type de représentation à avoir été mis en oeuvre [Ballard et Brown, 1982]. Elle fait intervenir un graphe dont les sommets correspondent aux points 3D caractéristiques de la surface de l'objet et dont les arcs représentent les arêtes physiques de l'objet. Aucune information de surface n'est disponible.

La modélisation surfacique fait intervenir une surface plus ou moins complexe ou un ensemble de petites surfaces pour représenter un objet. Ce type de modélisation s'avère particulièrement adapté à la conception de forme. Chaque surface est décrite indépendamment des autres. Les cohérences d'intégrité et de volume ne peuvent pas être directement vérifiées.

La modélisation volumique représente un objet comme un volume. Une discussion autour des différentes déclinaisons de familles de modélisation géométrique est proposée dans [Moron, 1996].

### 2.1.1 Applications

Les domaines d'application sont assez vastes. Les maillages polygonaux interviennent dans la simulation numérique, la conception assistée par ordinateur et la visualisation.

La simulation numérique utilise les maillages surfaciques ou volumiques pour vérifier ou prédire des résultats. Les disciplines concernées sont la mécanique des structures, les sciences de la terre pour le traitement visuel des reliefs et de leur texture, la mécanique des fluides, la médecine, etc. Les maillages polygonaux sont un excellent support pour la visualisation des données acquises à l'aide de scanner (surfacique ou volumique), la reconstruction des objets 3D, la simulation des déformations et la résolution des équations de la physique.

Dans le domaine de la conception assistée par ordinateur, les maillages polygonaux sont utilisés pour la modélisation de prototypes. Ils offrent une précision importante pour la représentation mathématique de la surface et peuvent être facilement adaptés aux contraintes de fabrication. Ils représentent un support adaptés aux modèles physiques (résistance des matériaux, aérodynamique, etc.).

Les maillages polygonaux sont utilisés pour visualiser une scène tridimensionnelle. Ils permettent la modélisation d'environnements réels ou imaginaires et offrent un certain confort pour l'animation et la navigation « temps réel ». La qualité visuelle peut se quantifier par rapport à la continuité des normales et la continuité des courbures. La qualité d'un maillage pourra également faire intervenir le nombre de mailles minimum nécessaires pour une précision de résolution donnée.

### 2.1.2 Les types de maillages polygonaux

Un maillage polygonal correspond à la représentation de la surface d'un objet. Il est composé de faces, c'est-à-dire d'un ensemble d'éléments polygonaux qui peuvent être des triangles, des quadrilatères (quadrangles), des polygones quelconques, etc. (figure 2.1). La notion de maillages simplexes est introduite dans [Delingette, 1999]. Ces maillages sont irréguliers et leur topologie est duale de la triangulation; tous les sommets de ce maillage possèdent 3 sommets voisins, à l'exception des sommets situés aux bords. Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes focalisés sur les maillages triangulaires, qui sont une solution de choix dans l'industrie, de par leur simplicité, leur flexibilité et leur omniprésence. Un maillage triangulaire est composé d'un ensemble de faces triangulaires reliées entre elles. On trouve dans la littérature certaines dénominations pour ces sommets comme les nœuds, les vertex ou les vertices. Les sommets sont reliés

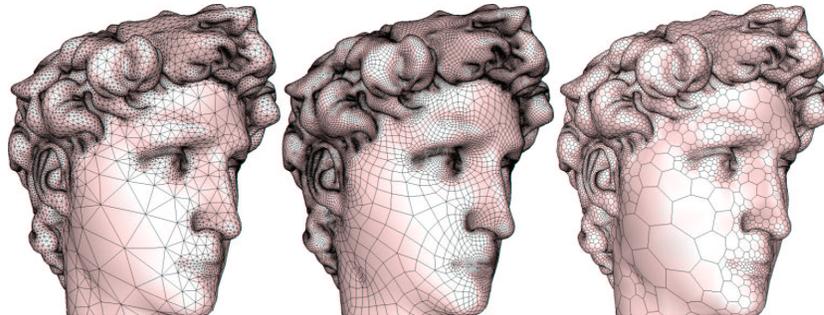


FIG. 2.1 – Le modèle David représenté à l'aide de triangles, des quadrangles et des polygones (image extraite de [Alliez *et al.*, 2003b]).

entre eux par des arêtes (aussi appelées arcs). Les sommets donnent une information géométrique du maillage ; les arêtes apportent une information topologique. La valence d'un sommet correspond au nombre d'arêtes incidentes. Le degré d'une face représente le nombre d'arêtes la composant.

### Multi-résolution

Les maillages peuvent contenir plusieurs niveaux d'information, on parlera alors de maillage multi-résolutions. Dans le cas d'un maillage mono-résolution, l'objet 3D dispose uniquement d'informations sur un seul niveau. Tous les polygones ont la même importance et l'affichage de l'objet nécessite la lecture intégrale des données associées. Les maillages multi-résolutions (aussi appelés maillages hiérarchiques) font intervenir plusieurs niveaux de détails, l'objet 3D peut ainsi être modélisé de manière grossière ou très détaillée. Les avantages d'une telle représentation sont particulièrement intéressants : il est possible d'adapter la résolution de l'objet en fonction du support, de permettre la progressivité de l'affichage, la compression, la décompression et la transmission des données [Hoppe, 1996], etc.

### Régularité

Un maillage est régulier lorsque chaque sommet le composant (sauf ceux des bords) possède un nombre de voisins constant. A l'inverse, un maillage irrégulier disposera de sommets dont le nombre de voisins est variable (Figure 2.2).

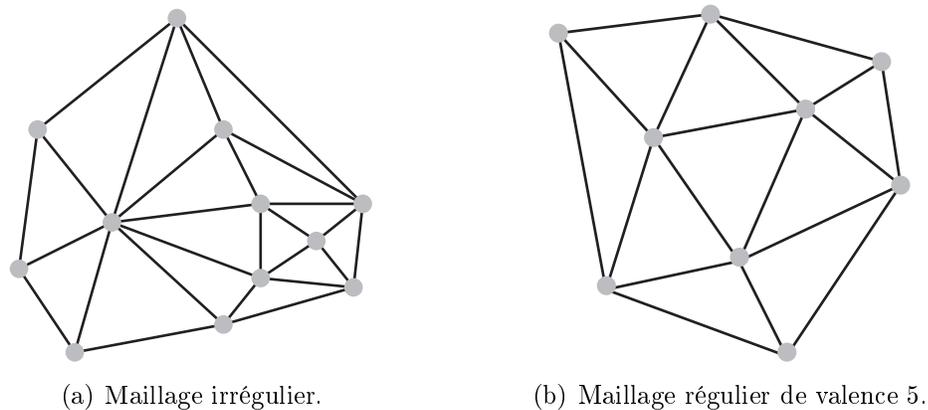


FIG. 2.2 – Régularité du maillage.

Un maillage semi-régulier correspond à un maillage irrégulier où chacun des triangles le constituant possède un maillage régulier (Figure 2.3). Ce type de maillage est très utilisé dans le cadre de la multi-résolution [Lee *et al.*, 1998]. Il permet de stocker les informations topologiques minimum à chaque niveau de résolution. Une technique de

subdivision quaternaire permet de rendre implicite les informations topologiques nécessaires pour passer d'une résolution à l'autre. La figure 2.3 fait apparaître ce principe avec la subdivision des triangles du maillage de gauche en quatre sous-triangles.

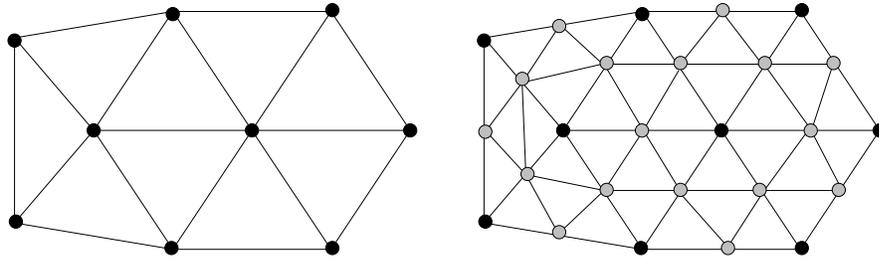


FIG. 2.3 – Maillage irrégulier et maillage semi-régulier (en noir les sommets irréguliers, en gris, les sommets réguliers).

### Conformité

Un maillage est dit conforme si tous les éléments géométriques le constituant sont d'aires non nulles et si l'intersection de deux éléments géométriques de ce maillage est soit vide, soit réduite à un sommet ou soit correspond à l'intégralité d'une arête. Un maillage non-conforme pourra faire apparaître par exemple la connexion du sommet d'un élément avec le milieu d'une arête comme sur la figure 2.4.

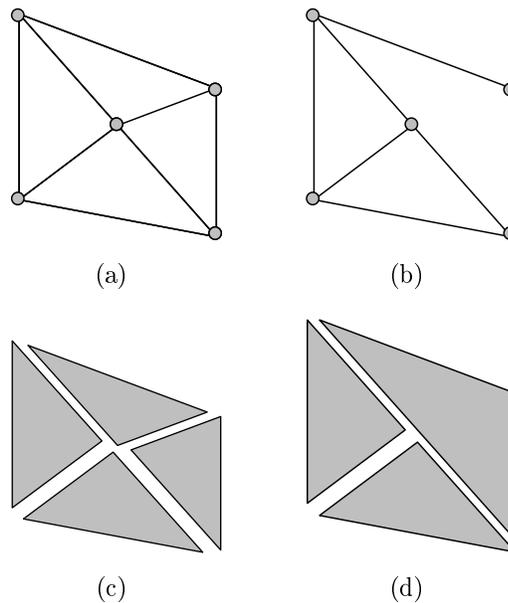


FIG. 2.4 – (a) Maillage conforme et (b) maillage non-conforme. (c) et (d) correspondent respectivement à la représentation des éléments géométriques du maillage conforme et du maillage non-conforme.

### Critère de Delaunay

Certains maillages triangulaires respectent le critère de Delaunay qui veut que l'ensemble des cercles circonscrits aux triangles formant le maillage ne contiennent aucun sommet (Figure 2.5). La méthode de triangulation de Delaunay permet de répondre à des problèmes tels que la triangulation d'un domaine quelconque par exemple.

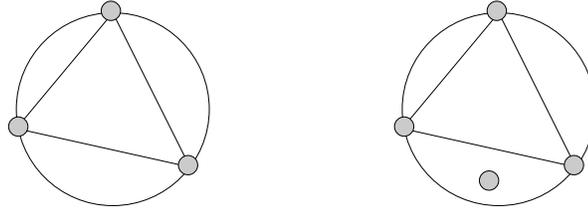


FIG. 2.5 – Triangle Delaunay (à gauche), triangle non-Delaunay (à droite).

Le diagramme de Voronoï apparaît comme le dual de la triangulation de Delaunay ; il est une décomposition particulière d'un espace métrique déterminée par les distances à un ensemble discret d'objets (généralement des points) de l'espace. La figure 2.6 illustre les différentes étapes de la création d'un maillage à partir d'un nuage de points en utilisant le diagramme de Voronoï et la triangulation de Delaunay.

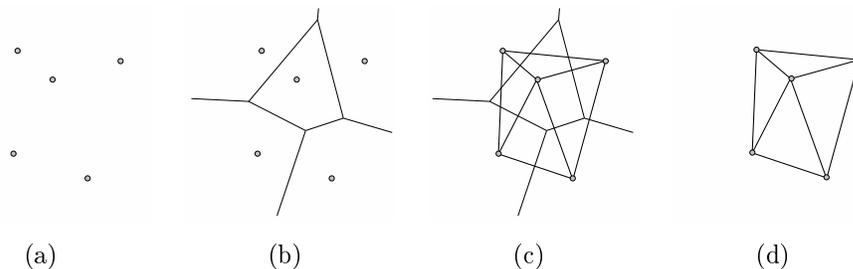


FIG. 2.6 – Création d'un maillage à partir de la triangulation de Delaunay. : (a) Nuage de points, (b) diagramme de Voronoï, (c) triangulation de Delaunay et (d) maillage triangulaire.

### Variétés

Un maillage rentre dans le cadre des variétés (aussi appelé manifolds). Les maillages polygonaux sont généralement *2-Manifold*, c'est-à-dire qu'ils disposent de faces simples et qu'ils respectent les propriétés suivantes :

- Propriété du disque local : en chaque point du maillage, il existe une sphère de rayon supérieur à 0 telle que l'intersection entre la sphère et le maillage est homéomorphe à un disque (variété sans bord) ou à un demi-disque (variété avec bord).

- Propriété d'ordonnancement des arêtes : pour chaque point du maillage, les voisins doivent pouvoir être ordonnés circulairement.
- Propriété de voisinage de face : chaque arête du maillage doit avoir exactement deux faces adjacentes si c'est une arête intérieure au maillage et une seule si c'est une bordure du maillage.

Un maillage *non-manifold* pourra être caractérisé par le fait qu'il n'est pas possible de distinguer l'intérieur et l'extérieur sans ambiguïté. Un maillage sera considéré comme fermé s'il n'a pas de bord.

### Orientation d'un maillage

On dira qu'un maillage est orientable lorsque la notion d'intérieur et d'extérieur existe. L'information d'orientation est généralement disponible dans les modèles 3D existants par rapport aux normales. Dans la plupart des cas, les normales sont identifiées par rapport à l'ordre dans lesquels sont lus les sommets des faces. L'anneau de Möbius et la bouteille de Klein sont de célèbres surfaces non-orientables (Figure 2.7).

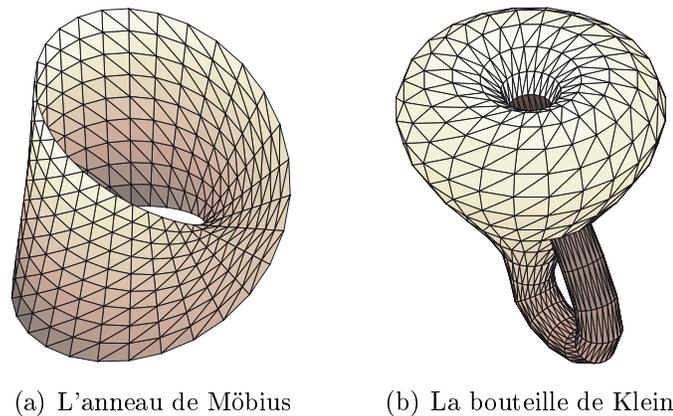


FIG. 2.7 – Célèbres surfaces non-orientables.

### Décomposition cellulaire :

Une variété est associée à la caractéristique d'Euler-Poincaré qui se calcule à partir de la formule suivante :

$$\chi = s - a + f \quad (2.1)$$

avec  $s$ , le nombre de sommets,  $a$ , le nombre d'arêtes et  $f$  le nombre de faces. Cette caractéristique fait état du potentiel de subdivision de la surface. La caractéristique d'Euler-Poincaré est liée au genre (le nombre maximum de courbes fermées simples sans point commun que l'on peut tracer à l'intérieur de la surface sans la déconnecter).

Dans certains cas, on peut associer le genre au nombre de trous de la surface fermée. Une surface bornée sans bord orientable vérifie l'équation :

$$\chi = 2c - 2g + t \quad (2.2)$$

avec  $c$  le nombre de composantes connexes,  $g$  le nombre de trous à travers l'objet ou genre et  $t$  le nombre de bords de la surface.

### Dualisation

Il est possible d'exprimer un maillage dual par rapport au maillage d'origine (primal) ; le dual pourra par exemple être utilisé dans le cadre de partition du maillage. Chaque entité du maillage primal de dimension  $k$  peut être remplacée par une entité de dimension  $(k - 2)$  dans le maillage dual. Une face (dimension 2) pourra être remplacée par un point (dimension 0), les arêtes garderont leur dimension et les points seront remplacés par des faces. La figure 2.8 représente les différentes étapes de la création du maillage dual : un point est placé au barycentre de chaque face et une connexion peut être établie par une arête entre deux nouveaux points si les faces associées sont adjacentes dans le maillage primal. Le graphe dual du diagramme de Voronoï est appelé le graphe de Delaunay.

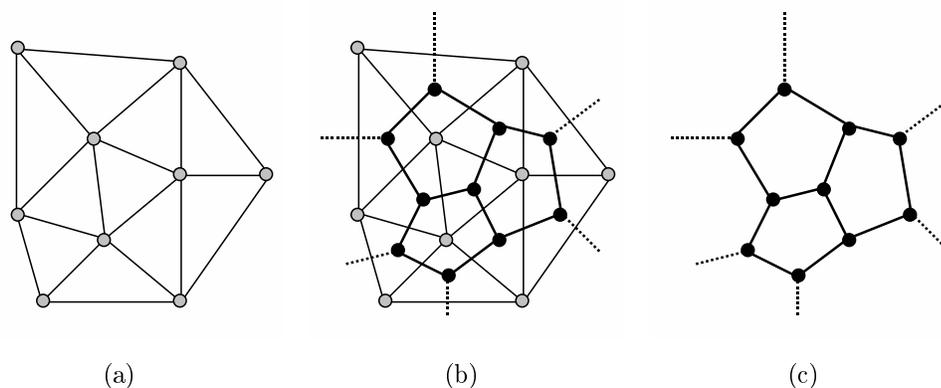


FIG. 2.8 – Du maillage primal au maillage dual.

## 2.2 Problématique de segmentation

Un maillage est une paire  $(P, K)$  telle que  $P$  représente un ensemble de  $n$  points  $p_i = (x_i, y_i, z_i) \in \mathbb{R}^3$  avec  $i \in \{1, \dots, n\}$  et  $K$  un complexe simplicial portant les informations topologiques.  $K$  peut se définir à partir d'un triplet  $\{V, E, F\}$  où les vertex correspondent à  $V = \{p_i | p_i \in \mathbb{R}^3, 1 < i < n\}$ , les arêtes à  $E = \{(p_i, p_j) | p_i, p_j \in V\}$  et les faces à  $F = \{(p_i, p_j, p_k) | p_i, p_j, p_k \in V\}$  dans le cas de maillages triangulaires.

**Définition 1.** Deux sommets  $i \in K$  et  $j \in K$  sont voisins si l'arête  $\{i, j\} \in K$ .

**Définition 2.** Un ensemble de sommets est dit indépendant si aucun de ses éléments n'a de voisin dans ce même ensemble.

**Définition 3.** Un ensemble de sommets est dit indépendant maximal si aucun ensemble indépendant ne le contient.

**Définition 4.** Le 1-voisinage d'un sommet  $i \in K$  est l'ensemble  $V_1(i) = \{j \mid \{i, j\} \in K\}$ .

**Définition 5.** Le degré d'un sommet  $i \in K$  correspond à la cardinalité de son 1-voisinage :  $d_1(i) = \text{card}(V_1(i))$ .

**Définition 6.** Une arête voisine à un sommet est une arête qui contient ce sommet. L'arête  $\{i, j\}$  est voisine à  $i$  et à  $j$ .

**Définition 7.** Une face voisine à un sommet est une face qui contient ce sommet. L'arête  $\{i, j, k\}$  est voisine à  $i$ ,  $j$  et à  $k$ .

Soit  $M$  un maillage polygonal et  $S$  un élément du maillage qui correspond à  $V$ ,  $E$  ou  $F$ . La segmentation  $\Sigma$  de  $M$  est un ensemble de sous-maillages  $\Sigma = \{M_0, \dots, M_{k-1}\}$  induite par la partition de  $S$  en  $k$  sous-ensembles disjoints.

En utilisant un sous-ensemble  $S' \subset S$ , un sous-maillage  $M' \subset M$  peut être créé en choisissant tous les sommets  $V'$  qui sont inclus dans  $S'$  et en définissant  $M' = \{V', E', F'\}$  où  $E' = \{(p_i, p_j) \mid p_i, p_j \in V'\}$  rassemble toutes les arêtes ayant leurs deux sommets dans  $V'$  et où  $F'$  rassemble toutes les faces ayant leurs sommets dans  $V'$ . L'ensemble  $S$  peut intégrer des sommets, des arêtes ou des faces du maillage et le partitionnement de  $S$  induit une segmentation du maillage  $M$ . La plupart des algorithmes de segmentation de maillages réalisent le partitionnement par rapport aux faces du maillage ( $S = F$ ), quelques-uns par rapport aux sommets ( $S = V$ ) et peu par rapport aux arêtes ( $S = E$ ). Le problème revient alors à décider de quelle manière réaliser le partitionnement de  $S$ , ce qui dépend fortement de l'application.

L'association de la segmentation et du partitionnement de graphe se rencontrent dans de nombreux domaines de recherche, notamment en segmentation d'images 2D et 3D [Leonardis *et al.*, 1997][Gotsman, 2003][Marcotegui et Beucher, 2005], en segmentation de maillages [Karypis et Kumar, 1998][Hettiaratchi et Cheung, 2003][Korošec *et al.*, 2004] et en partitionnement de nuages de points [Roberts, 1997][Chaine et Bouakaz, 2000][Chevalier *et al.*, 2001][Comaniciu et Meer, 2002][Haralick et Harpaz, 2007]. Bien que ces champs de recherches soient assez différents, ils font appel à des techniques qui sont assez similaires. Il est courant de voir des techniques de segmentation d'images 2D adaptées à des images 3D ou à des maillages. Dans le cas des maillages, certaines

méthodes de segmentation [Gotsman, 2003] font appel au graphe dual du maillage. En considérant  $S$  comme l'ensemble à partitionner dans le maillage  $M$ , on peut construire le graphe dual  $G$  de  $M$  en représentant chaque élément de  $S$  par un nœud dans  $G$  et en définissant les arcs dans  $G$  par la relation d'adjacence dans  $M$  entre les éléments de  $S$ . Si  $S = F$  alors chaque nœud de  $G$  représentera une face dans  $M$  et chaque arc connectera des faces adjacentes (Figure 2.8).

A partir d'une telle représentation, le problème de la segmentation de maillages peut être considéré comme le partitionnement d'un graphe (sous contrainte). Par cette analogie, on peut conclure que le problème de segmentation de maillages est au moins NP-complet et souvent NP-difficile. En outre, si  $|\Sigma| = k$  et  $|S| = n$ , alors l'énumération complète de toutes les solutions possibles est irréalisable du fait que l'espace de recherche est d'ordre  $k^n$ . Il est donc primordial d'approximer la solution pour rester dans des temps de calcul raisonnables. Dans [Shamir, 2004][Shamir, 2006][Agathos *et al.*, 2007], les différentes solutions de segmentation font intervenir des méthodes basées sur :

- la croissance de région,
- le partitionnement hiérarchique,
- le partitionnement itératif,
- le partitionnement spectral,
- les modèles déformables,
- la coupe de graphe,
- la squelettisation.

### 2.2.1 Contraintes et critères de partitionnement

Les algorithmes de segmentation de maillages font appel à des critères pour le partitionnement et des contraintes à imposer au procédé. Ces critères et contraintes sont fortement liés à l'application. Shamir a toutefois proposé un ensemble de contraintes et de critères en faisant abstraction de l'objectif des différentes segmentations :

- la cardinalité de l'ensemble des éléments de la partition permet d'éliminer les régions trop petites ou trop larges. Une borne au niveau du nombre d'éléments maximum et minimum peut être imposée. Un ratio entre le nombre maximum et minimum d'éléments peut également être considéré pour disposer de partitions plus équilibrées,
- la géométrie des sous-maillages issus du partitionnement peut subir des contraintes au niveau de la surface, de la convexité, du rayon, du périmètre, du ratio du périmètre ou du rayon par rapport à l'aire du sous-maillage,

- la forme du maillage peut également être restreinte à partir de contraintes topologiques.

Les attributs des éléments sont utilisés comme critères pour le procédé d'optimisation de la partition. Il en existe différents types :

La **courbure**, la **rugosité**, la **direction des normales**, l'**angle dièdre**, les **lignes de crêtes** et autres **caractéristiques** de la surface [Lai *et al.*, 2007] apparaissent comme les meilleurs indicateurs pour segmenter le modèle par rapport à sa surface.

La **distance Euclidienne** permet de générer des carreaux surfaciques en fonction de l'approximation à une primitive (plan, sphère, cylindre, etc.) [Attene *et al.*, 2006a].

La **distance géodésique** définit une distance entre des éléments par rapport à la surface du modèle 3D. La **centricité** peut intervenir comme un attribut des éléments [Shamir *et al.*, 2006]. Elle correspond à la moyenne de la distance géodésique de chaque vertex à tous les autres. Elle permet de mettre en avant les protubérances du maillage.

Le **squelette** de la forme offre des informations pertinentes sur les différentes parties du modèle 3D où les arcs et les intersections du graphe représentant le squelette sont de bons indicateurs des parties et des frontières de la forme.

La fonction de **diamètre de volume** [Shamir *et al.*, 2005][Shapira *et al.*, 2007] permet de faire la distinction entre les parties fines et larges d'un modèle et d'établir une bonne description du volume sans contrainte particulière de la pose (« posture ») du modèle 3D.

La **symétrie** est utilisée dans [Podolak *et al.*, 2006] pour réaliser le partitionnement du maillage. Pour chaque face et les  $m$  plans de symétrie les plus significatifs trouvés, est mesurée la contribution à la symétrie par rapport à ce plan. Tous les points ont un vecteur de caractéristiques de dimension  $m$ . Le partitionnement des faces est réalisé par rapport à leur proximité dans l'espace de caractéristiques de dimension  $m$ .

[Gelfand et Guibas, 2004] ont proposé récemment un critère relatif à l'**analyse du glissement local** (*local slippage analysis*). L'objectif est de rassembler des éléments qui possèdent un ou plusieurs mouvements de glissement. Les « formes de glissement » ont la propriété d'être symétriques selon certaines translations et rotations comme c'est le cas pour la sphère, le cylindre ou le plan. Gelfand et Guibas présentent ce critère comme particulièrement adapté aux modèles 3D de C.A.O et ont montré comment déterminer le glissement d'une forme donnée en calculant les valeurs propres d'une matrice symétrique issue des points et des normales de la forme.

L'information de **mouvement** peut guider la décomposition. A partir d'une estimation des mouvements possibles du modèle 3D, la décomposition est utilisée pour réaliser le rendu par *ray-tracing* d'une scène animée en temps réel [Günther *et al.*, 2006], pour la compression géométrique relative à l'animation [Sattler *et al.*, 2005][Lee *et al.*, 2005a], etc.

Le procédé de création des carreaux peut être contraint par la **distorsion** dans le cadre d'applications relatives à la paramétrisation [Sorkine *et al.*, 2002].

Il existe différentes normes pour définir les critères [Shamir, 2004]. Dans le cas de la planéité, on rencontre souvent l'association d'un cluster représenté par le plan d'équation  $ax + by + cz + d = 0$  à l'une des distances suivantes :

**La distance**  $L^\infty$  permet à un sommet  $v = (v_x, v_y, v_z)$  d'être accepté ou rejeté dans ce cluster en fonction de la distance maximale à ce plan suivant l'inéquation :

$$|(v_x, v_y, v_z, 1) \cdot (a, b, c, d)| \leq \epsilon$$

**La distance**  $L^2$  correspond à la distance moyenne d'un ensemble de sommet  $v_i$  au plan suivant l'inéquation :  $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k ((v_x, v_y, v_z, 1)_i \cdot (a, b, c, d))^2 \leq \epsilon$

**L'orientation**  $L^\infty$  définit une mesure entre le plan et une face ou un sommet de normale  $n = (n_x, n_y, n_z)$ . La distance correspond à la différence maximale des normales suivant :  $(1 - (n_x, n_y, n_z) \cdot (a, b, c)) \leq \epsilon$

**L'orientation**  $L^2$  établit une mesure entre le plan et un ensemble de faces ou de sommets de normale  $n_i$ . La distance correspond à la moyenne des différences des normales suivant :  $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (1 - (n_x, n_y, n_z)_i \cdot (a, b, c))^2 \leq \epsilon$

Pour des surfaces qui ne sont pas forcément planaires, il est possible de définir des clusters par rapport à la distance géodésique sur le maillage, aux différences des normales, aux angles dièdres entre les faces ou des courbures.

## 2.2.2 Évaluation de la segmentation

La segmentation de maillages polygonaux est un problème vaste. Elle concerne une multitude d'applications et fait intervenir de nombreuses méthodes avec des critères de segmentation variés. [Attene *et al.*, 2006b] soulignent la difficulté d'évaluation de la segmentation compte tenu des différents contextes d'utilisation.

Le problème de l'évaluation est important car il est nécessaire aux chercheurs pour comparer un nouvel algorithme à ceux existants et aux utilisateurs pour choisir une méthode et régler les paramètres en fonction du problème à résoudre. L'étude de [Philipp-Foliguet et Guigues, 2006] concerne l'évaluation de la segmentation en régions sur les images. De nombreux outils d'évaluation sont décrits dont la plupart sont difficilement transposables dans le domaine des maillages polygonaux.

Les critères d'évaluation quantitative peuvent se regrouper en deux classes selon qu'on dispose ou non d'une « vérité terrain » qui constitue une segmentation de référence. Dans le cas des images, la vérité terrain est souvent « dessinée » par un expert du domaine. Il n'existe généralement pas de solution unique à la division d'une image en régions « pertinentes ». Cependant, plusieurs segmentations d'images réalisées à la main tendent à être cohérentes car elles sont des raffinements mutuels les unes des autres [Cardoso et Corte-Real, 2005] et la principale différence correspond au niveau de détails.

[Yu et Shi, 2004] ont récemment proposé une classification des méthodes de segmentation d'image en deux principales familles : d'une part une approche « discriminative » qui envisage la segmentation comme un problème de regroupement des pixels en classes compactes et séparées et d'autre part une approche « générative » qui aborde la segmentation comme un problème de recherche d'un modèle générateur de données (*generative model*).

Lorsqu'une vérité terrain est disponible, l'évaluation des segmentations est réalisée à l'aide de critères comparant chaque segmentation avec l'image de référence. Il existe de nombreuses mesures pour la comparaison comme la mesure de [Vinet, 1991] qui s'appuie sur l'appariement biunivoque entre les régions des deux segmentations à comparer par rapport à un ensemble maximal commun de pixels, la mesure de [Martin, 2003] qui définit la cohérence entre segmentations, la mesure de [Yasnoff *et al.*, 1977] basée sur la position des pixels mal segmentés, la distance de [Baddeley, 1992] qui prend en compte la position et l'intensité d'un pixel dans l'image, etc.

En l'absence de vérité terrain, des critères quantitatifs absolus ou des calculs de cohérence entre les différents résultats de segmentation peuvent être utilisés. D'après la classification des méthodes de segmentation proposée dans [Yu et Shi, 2004] ces critères se rangent dans deux principales catégories : les critères de contraste et les critères d'adéquation à un modèle. Les premiers sont liés à une variabilité inter-région, alors que les seconds concernent l'uniformité en intensité ou en couleur à l'intérieur des régions. [Chabrier, 2005] a proposé récemment une étude des différentes mesures utilisées en segmentation d'image. Les méthodes développées dans le cadre de l'évaluation non

supervisée sont basées sur l'adaptation du critère d'évaluation en fonction de l'image et sur la fusion de plusieurs critères par combinaison linéaire dont le poids et le choix des critères à fusionner sont déterminés par un algorithme génétique. Un état de l'art de la segmentation non supervisée d'image est disponible dans [Zhang *et al.*, 2008].

La qualité de la segmentation peut être évaluée à partir de méthodes employées en classification avec des critères géométriques tels que l'aire, le périmètre, des facteurs de formes comme la circularité, etc. La segmentation peut aussi être évaluée à partir de la qualité de la classification des objets extraits. Les classifieurs flous sont ainsi de bons indicateurs pour la qualité de la segmentation à partir du degré d'appartenance aux classes [Huet et Philipp-Foliguet, 1998].

La segmentation sur les maillages polygonaux présente de nombreuses différences par rapport à celle sur les images. Le maillage est un objet à décomposer en sous-maillages. Les sous-maillages souhaités peuvent être très différents selon l'application (paramétrisation, reconnaissance de forme, etc.). Dans le cas de la segmentation en carreaux surfaciques, l'évaluation de la segmentation rentre dans le processus global d'évaluation des résultats de l'application (paramétrisation, métamorphose, etc.); dans le cas de la segmentation en parties significatives, il n'existe pas de base d'expérimentation pour comparer les sous-objets obtenus par segmentation. De nombreuses bases sont en revanche disponibles pour les images, notamment celle de Berkeley [Martin *et al.*, 2001] qui met à disposition des images de références ainsi que les résultats de segmentation obtenus par un expert et par plusieurs algorithmes.

Les méthodes de segmentation sont généralement évaluées à partir de maillages issus de la base de données d'objets 3D AIM@SHAPE<sup>1</sup>, la base de formes de l'université de Princeton [Shilane *et al.*, 2004] ou encore la base d'objets scannés de l'université de Stanford<sup>2</sup>. Pour la segmentation au sens du mouvement de maillages dynamiques [Mamou *et al.*, 2007b], la base de test MPEG-4 AFX [Mamou *et al.*, 2006a] peut être utilisée. [Attene *et al.*, 2006b] ont proposé récemment une étude comparative des méthodes de segmentation de maillages où plusieurs critères d'évaluation de segmentation sont mis en avant.

- a) **Le type de segmentation** : il s'agit de définir à quelle catégorie appartient la segmentation désirée (segmentation en carreaux surfaciques ou en parties significatives). L'application guidera fortement le type de segmentation à utiliser.
- b) **La création de régions correctes** : il est difficile de juger si une segmentation offre des régions correctes car cela dépend de l'application, des connaissances de l'en-

---

<sup>1</sup><http://www.aimatshape.net>

<sup>2</sup><http://www.graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>

vironnement et de la perspective de l'observateur. L'œil humain reste pour l'instant le meilleur indicateur pour décider si la segmentation de maillages est correct.

- c) **La création de frontières correctes** : décider si une frontière est correcte ou non relève de la même difficulté que l'évaluation des régions. Il est cependant possible de nuancer la qualité en étudiant les propriétés géométriques au niveau de leur linéarité [Lee *et al.*, 2005b], leur longueur ou leur position le long des concavités.
- d) **La segmentation hiérarchique / multi-échelle** : il est intéressant de pouvoir disposer de plusieurs niveaux de segmentation pour décider lequel correspond le plus aux besoins de l'application. Les niveaux peuvent être construits par rapport à des segmentations de l'objet à des résolutions différentes ou bien en considérant le même objet et en utilisant un procédé de segmentation hiérarchique.
- e) **La sensibilité à la pose** : de nombreuses applications (métamorphose, reconnaissance de forme, etc.) nécessitent qu'un même objet puisse être segmenté de la même manière, peu importe la pose.
- f) **La complexité** : certaines contraintes (temps réel, place mémoire, etc.) peuvent faire intervenir des exigences qui ne sont pas compatibles avec certaines méthodes de segmentation. Les temps de calcul des algorithmes sont souvent utilisés pour définir l'efficacité des méthodes ; ils nécessitent d'être accompagnés des informations concernant l'implémentation et la plateforme sur laquelle les programmes sont exécutés. La complexité d'un algorithme apparaît comme une information intéressante qui offre des indications sur le comportement de l'algorithme selon les situations (le pire des cas par exemple).
- g) **Les paramètres de contrôle** : les possibilités de réglages sont un critère indirect du procédé de segmentation. Ainsi, si le nombre de paramètres à régler est trop important, l'outil de segmentation est considéré comme compliqué à utiliser.

Les sections suivantes abordent les différentes méthodes de segmentation. Elles concernent les problématiques de segmentation en carreaux surfaciques et en partie significatives. Les principaux objectifs des techniques de segmentation sont exposés et les principes de chaque méthode sont discutés.

## 2.3 La segmentation en carreaux surfaciques

De nombreuses applications font appel à la segmentation de maillages en carreaux surfaciques. Ces applications nécessitent le découpage de l'objet suivant des critères relatifs à la courbure, la convexité, l'approximation à une primitive, etc. Dans ce qui suit, les principaux concepts et applications sont définis. Un tableau récapitulatif des

caractéristiques et des critères utilisés par les méthodes est proposé à la fin de chaque section.

La **compression de maillage** est devenue une nécessité dans certaines applications impliquant le transfert et le stockage des données du maillage. Un état de l'art sur la compression de maillage a été proposé récemment par [Alliez et Gotsman, 2005]. Parmi les différentes méthodes de compression, certaines appliquent la décomposition spectrale : l'approche de [Karni et Gotsman, 2000] correspond à la projection de la géométrie du maillage sur un ensemble de vecteurs propres provenant de la diagonalisation de l'opérateur Laplacien discret. Pour limiter le coût de calcul des vecteurs propres, le maillage est partitionné et les opérations s'effectuent sur les sous-maillages. [Lavoué *et al.*, 2005a] ont proposé une approche basée sur une approximation par surface de subdivision pour la compression et le codage des maillages polygonaux. Leur méthode fait intervenir une segmentation en carreaux surfaciques dans un premier temps puis une approximation des frontières. Ils réalisent ensuite la subdivision de chaque carreau, les assemblent et encodent les informations du maillage. Le procédé de décompression autorise une subdivision du polyèdre à la résolution voulue. [Qin *et al.*, 2006] ont abordé la problématique du rendu photo-réaliste à l'aide d'une architecture parallèle et proposent un schéma de compression du maillage appelé PRMC (*Parallel Rendering based Mesh Compression*). La segmentation permet d'obtenir des sous-maillages qui sont ensuite compressés et envoyés à plusieurs serveurs de rendu pour le calcul des différentes parties de la scène.

Le **remaillage** concerne les méthodes de modification de l'échantillonnage des vertex et d'amélioration de la régularité du maillage et de la qualité des faces. Un état de l'art est proposé dans [Alliez *et al.*, 2005]. Parmi les différentes catégories de remaillage étudiées, le remaillage guidé par l'erreur d'approximation permet d'adapter le maillage à une résolution donnée et à la complexité locale des formes du maillage. Ce type d'approche peut faire intervenir la segmentation du maillage, comme dans les travaux de [Cohen-Steiner *et al.*, 2004], qui réalisent la simplification du maillage en le découpant en carreaux. Les différents carreaux générés doivent minimiser une erreur d'approximation à la forme globale. La **simplification** de maillage intervient comme une approche de remaillage spécifique où la réduction de la taille du maillage est privilégiée dans le but, par exemple, d'accélérer le rendu photo-réaliste d'une scène. La méthode de partitionnement hiérarchique utilisée dans [Garland *et al.*, 2001] peut être associée à de nombreuses applications, notamment la simplification du maillage où les différents carreaux peuvent être triangulés à la manière de [Kalvin et Taylor, 1996]. [Zuckerberger *et al.*, 2002] réalisent la segmentation du maillage et proposent une simplification des carreaux en ne maintenant que les vertex résidant sur les courbes caractéristiques du maillage et en utilisant un critère pour maintenir la forme globale de chaque carreau.

Une méthode générique de simplification est proposée dans [Sheffer, 2001]. Le partitionnement est dans un premier temps opéré selon des contraintes géométriques puis la fusion des régions est réalisée à partir de l'opérateur d'effondrement [Sheffer *et al.*, 1997] qui apporte une dispersion symétrique des faces entre les faces voisines.

La **paramétrisation** intervient dans diverses applications pour, par exemple, plaquer la surface texturée d'un maillage sur une image 2D, optimiser les maillages ou encore convertir des surfaces triangulées en surfaces polynomiales. Des études sur la paramétrisation de maillages ont été menées dans [Lévy et Mallet, 2000][Floater et Hormann, 2005][Sheffer *et al.*, 2007]. La méthode de génération d'atlas de texture proposée dans [Lévy *et al.*, 2002] fait intervenir trois principaux procédés : la segmentation du maillage en carreaux, la paramétrisation des différents carreaux où chacun d'eux est mis en correspondance avec un sous ensemble dans  $\mathbb{R}^2$  et le rangement des carreaux aplatis sous une contrainte de minimisation d'occupation d'espace (problématique de *bin-packing*). [Sander *et al.*, 2003] utilisent le procédé de génération d'atlas pour appliquer une texture sur des carreaux de formes arbitraires. Ces carreaux sont alors rangés dans une image de géométrie [Gu *et al.*, 2002] puis les discontinuités aux frontières sont supprimées pour obtenir une image composée de carreaux connectés. [Zhou *et al.*, 2004] utilisent l'analyse spectrale de la surface pour obtenir une paramétrisation initiale. Après optimisation de la paramétrisation, si le résultat n'est toujours pas satisfaisant, le maillage subit un partitionnement spectral et une optimisation des frontières à partir de techniques de coupes de graphe. [Julius *et al.*, 2005] ont présenté une méthode de segmentation basée sur une métrique de développabilité de surface de maillage. Leur méthode permet une génération d'atlas de texture selon un procédé de segmentation qui utilise directement l'information de distorsion de l'atlas. La conception d'objets en papier (*papercraft*) à partir de modèles 3D fait partie des applications.

Le **plaquage de texture**(aussi connu sous le nom de mappage de texture) est un outil adapté à la création, la coloration et le rendu d'objets 3D à haut niveau de détails, associé à un faible coût géométrique. La représentation de la forme et l'apparence de la surface sont dissociées. [Sander *et al.*, 2001] ont proposé un mappage de texture sur les maillages progressifs. A partir d'un maillage arbitraire, un maillage progressif est construit pour que tous les maillages de la séquence de construction des maillages progressifs partagent une paramétrisation de texture commune. Le maillage est dans un premier temps partitionné, une paramétrisation est ensuite opérée pour obtenir une représentation des carreaux dans l'espace  $\mathbb{R}^2$  puis le maillage est simplifié sous la contrainte de minimisation de variation de texture. L'optimisation de la paramétrisation réduit ensuite les variations et les déformations des maillages progressifs de la séquence. L'atlas de texture est rangé et les échantillons de textures présentés proviennent du maillage initial. [Sorkine *et al.*, 2002] ont réalisé simultanément la segmentation et la

paramétrisation pour limiter les distorsions aux frontières des carreaux. Leur méthode est particulièrement adaptée au mappage de texture et à la peinture 3D (l'utilisateur peut peindre directement sur la surface du modèle 3D). [Carr *et al.*, 2006] ont proposé une segmentation du maillage en carreaux rectangulaires en préservant une correspondance entre les éléments de texture le long des frontières de carreaux. On pourra se référer aux travaux de [Lefebvre et Dachsbacher, 2007] où apparaissent les plus récentes avancées en matière de mappage de texture.

La **métamorphose** correspond au procédé de transformation d'un objet en un autre. Des états de l'art sur les différentes méthodes de métamorphose 3D ont été proposés dans [Lazarus et Verroust, 1998][Alexa, 2002]. Une des principales approches pour établir une correspondance entre deux maillages est le découpage en plusieurs carreaux. Chaque carreau correspond à un disque topologique et peut être plaqué sur un plan en utilisant une technique de paramétrisation. Les formes doivent être découpées pour que les graphes représentant les coupes des maillages aient la même topologie. Parmi les travaux portant sur la segmentation avec application à la métamorphose, on pourra citer [Gregory *et al.*, 1999][Zöckler *et al.*, 2000][Zuckerberger *et al.*, 2002][Shlafman *et al.*, 2002].

La **détection de collisions** 3D est une thématique très présente en synthèse d'image et en robotique [Lin et Gottschalk, 1998] [Jiménez *et al.*, 2001] [Dequidt *et al.*, 2002]. Les algorithmes de détection exacte se basent généralement sur des polyèdres rigides convexes. La détection d'intersection de deux polyèdres convexes est de complexité linéaire dans le pire des cas. La détection de collisions entre objets concaves peut être ramenée à une détection de collisions entre objets convexes par une décomposition de l'objet en parties convexes. Pour réduire les temps de calcul, il est possible de restreindre les tests de collisions à certaines zones des objets. Mettre en place une hiérarchie de volumes englobants fait partie des différentes stratégies pour trouver les portions les plus significatives de l'objet. La construction de ces boîtes englobantes peut être réalisée à partir des méthodes de segmentation proposées dans [Li *et al.*, 2001][Garland *et al.*, 2001].

La **rétro-ingénierie** (*reverse engineering*) se définit comme l'étude d'un objet pour en déterminer le fonctionnement et les procédés qui ont servi à sa création. Dans le domaine de la modélisation géométrique, certaines applications nécessitent la création de modèles géométriques d'objets existants pour lesquels aucun modèle n'est disponible. [Várady *et al.*, 1997] ont proposé une introduction à la rétro-ingénierie sur les modèles géométriques. Le procédé de rétro-ingénierie dans le domaine de la modélisation géométrique fait intervenir l'acquisition des données, la caractérisation globale de la forme, la segmentation et l'ajustement de la surface et enfin la création du modèle. Les tra-

vaux de [Meyer et Marin, 2004][Benkó et Várady, 2004][Vieira et Shimada, 2005][Lavoué *et al.*, 2005b][Attene *et al.*, 2006a] offrent différentes solutions à la problématique de segmentation.

Les **interfaces** pour éditer et modifier les images s'orientent de plus en plus vers une interaction intelligente. Des outils comme la sélection d'objets [Tan et Ahuja, 2001], la suppression d'objets dans une image [Nielsen et Nock, 2005] ou la segmentation d'image par coupe de graphe [Li *et al.*, 2004] offrent une certaine flexibilité entre l'ordinateur et l'utilisateur. Les travaux de recherche en matière d'édition et de manipulation de modèle 3D sont nombreux, on peut citer le procédé d'édition du maillage sous contrainte de préservation de détail [Nealen *et al.*, 2005], la conception de modèles 3D à partir du dessin et de la modification de courbes [Nealen *et al.*, 2007], etc. Certains procédés de segmentation sont utilisés dans des applications telles que la coupe interactive du maillage [Lee *et al.*, 2004][Lee *et al.*, 2005b] et le mélange de modèles [Ji *et al.*, 2006].

La **reconnaissance de forme** d'un modèle 3D fait généralement intervenir un procédé de recherche de modèles 3D de formes similaires dans une base de données. Une approche classique est d'associer à chaque objet une signature qui correspond à un ensemble de caractéristiques. Les travaux de [Zuckerberger *et al.*, 2002][Tal et Zuckerberger, 2006] font intervenir la décomposition de l'objet 3D en carreaux convexes et la comparaison de chaque carreau à une primitive simple. Un graphe représentant la décomposition est ensuite construit pour établir la signature de l'objet.

La **radiosité** correspond à une technique d'éclairage d'une scène 3D. Une des difficultés majeures est la gestion de la mémoire qui est au moins proportionnelle au nombre de polygones de la scène. Un nombre trop important de polygones dégradera fortement le calcul de la radiosité. La gestion de scène complexe implique des méthodes qui utilisent la mémoire et qui s'exécutent de manière sous-linéaire par rapport au nombre de polygones de la scène. Certaines techniques [Willmott *et al.*, 1999][Garland *et al.*, 2001][Gobbetti *et al.*, 2003] regroupent les faces en carreaux surfaciques et réalisent le calcul de radiosité sur les carreaux et non plus sur l'ensemble des faces.

Le **tatouage numérique** peut intervenir dans la protection des droits d'auteurs des modèles 3D. Par exemple, un message permettant d'identifier le propriétaire de l'objet peut être dissimulé en modifiant légèrement la position de certains sommets du maillage. L'étude de [Rondão Alface, 2006] traite des tatouages numériques sur les formes 3D et aborde les différentes méthodes pour résister aux attaques (manipulations habituelles ou malicieuses de la structure représentant le modèle 3D). L'attaque qui consiste à découper le maillage (pour s'en approprier une partie par exemple) pose des difficultés aux méthodes de tatouage utilisant les informations réparties sur l'ensemble du maillage.

[Rondão Alface *et al.*, 2007] ont proposé de segmenter le maillage et de déposer des tatouages sur les différents sous-maillages. Les protrusions (sommets les plus éloignés localement du centre de la surface) sont utilisées pour définir les différents carreaux surfaciques. La méthode de [Ohbuchi *et al.*, 2002] génère de façon semi-automatique des sous-maillages à partir de la définition manuelle de deux germes puis du calcul du chemin géodésique entre ces deux points. Ce chemin correspond à l'approximation d'une arête d'un triangle régulier appliqué sur le maillage. Ce triangle est utilisé comme modèle pour générer un pavage de triangles réguliers sur l'intégralité du maillage. Ils permettent le calcul des différents carreaux surfaciques sur lesquels sera tatoué un message. [Lee et Kwon, 2007] définissent le nombre de carreaux surfaciques par rapport à la robustesse recherchée du tatouage numérique. Le maillage est partitionné de manière itérative à partir de sommets sélectionnés au hasard.

Les méthodes de segmentation utilisées dans les applications citées réalisent généralement un découpage par rapport à la surface de l'objet en construisant des carreaux surfaciques selon des critères de planéité, de courbure constante, etc. Nous discutons dans les sections suivantes des différentes méthodes de segmentation et mettons en valeur les travaux les plus pertinents.

### 2.3.1 La croissance de régions

La croissance de régions représente une des méthodes les plus intuitives pour segmenter un maillage. L'algorithme 1 de croissance de régions est initialisé à partir d'un élément germe et la croissance est réalisée en ajoutant successivement les éléments compatibles (qui répondent à un critère) de la façon suivante :

---

**Algorithme 1** : Croissance de régions

---

**début**

    Initialiser une file d'attente  $Q$

    Choisir un germe et l'insérer dans  $Q$

    Définir une région  $R$  à partir du germe

**tant que**  $Q \neq \emptyset$  **faire**

        Retirer le prochain élément  $s$  de  $Q$

**si**  $s$  est compatible avec la région  $R$  **alors**

            Ajouter  $s$  à la région  $R$

            Insérer les voisins de  $s$  dans  $R$

**fin**

---

L'algorithme **superface** [Kalvin et Taylor, 1996] utilise un procédé de croissance de régions avec des régions (*clusters*) de forme ellipsoïdale rassemblant des sommets par rapport à un plan. Les critères de partitionnement utilisés sont la distance  $L^\infty$  des sommets par rapport au plan et l'orientation des faces par rapport au plan. Les germes sont choisis au hasard. Les frontières sont ajustées lors de l'étape de finalisation.

La décomposition du maillage en parties convexes peut utiliser la croissance de régions. [Chazelle *et al.*, 1997] définissent deux approches de croissance sur le maillage dual : la première collecte les faces adjacentes tant que la région reste dans les limites de convexité imposées ; la seconde (croissance contrôlée) fait intervenir des règles supplémentaires (taille de la région, etc.) pour arrêter la croissance. Chazelle *et al.* soulignent que la convexité peut être vérifiée au niveau local ou global mais que dans le second cas, le problème devient difficile.

Dans le cadre de la subdivision de maillages triangulaires avec des contraintes de connexité dans les sous-maillages, une croissance de régions à sources multiples est utilisée dans [Eck *et al.*, 1995]. Le maillage dual est dans un premier temps partitionné à partir du diagramme de Voronoï en un ensemble de cellules de Voronoï. La construction du diagramme de Voronoï correspond à un problème de plus court chemin à sources multiples. L'algorithme réalise ensuite la croissance des cellules de Voronoï à partir de germes spécifiques. Trois contraintes sont imposées pour la création des carreaux : un carreau doit être homéomorphe à un disque, deux carreaux ne peuvent se partager plus d'une frontière consécutive et un sommet pourra être le point de rencontre de trois carreaux au maximum. Le premier germe est initialisé au hasard et les autres sont successivement ajoutés dès lors qu'une contrainte n'est pas respectée.

[Papaioannou *et al.*, 2000] mettent en œuvre une méthode qui identifie les régions compactes du maillage et qui extrait les caractéristiques invariantes par rapport aux attributs géométriques. La technique de segmentation correspond à une croissance de régions qui rassemble les faces qui ont sensiblement les mêmes orientations. Les petites régions dont l'aire représente une trop faible proportion par rapport à la surface du maillage sont fusionnées avec leur région voisine la plus similaire.

Une méthode qui segmente le maillage et en définit simultanément la paramétrisation est proposée dans [Sorkine *et al.*, 2002]. Les germes sont choisis au hasard et la croissance de régions est réalisée en fonction de l'optimisation de différents critères. Lorsqu'une face est rencontrée, la distorsion par rapport à sa transformation en 2D est mesurée pour décider si elle sera ajoutée à la région.

La méthode de génération d'atlas de texture proposée dans [Lévy *et al.*, 2002] utilise

un procédé de croissance de régions pour saisir l'intégralité des éléments composant les carreaux. En effet, l'algorithme s'attache à extraire dans un premier temps des contours caractéristiques puis à réaliser une série de croissances de régions dans chacun des carreaux potentiels. L'algorithme de segmentation fait intervenir plusieurs contraintes :

- les frontières des carreaux doivent être positionnées de telle sorte que les discontinuités entre les carreaux soient localisées dans des zones où ils ne causeront pas d'artéfact de texture,
- les carreaux doivent être homéomorphes à des disques et la paramétrisation ne doit pas présenter trop de déformation.

La méthode de décomposition de maillage polygonal proposée par [Zhang *et al.*, 2002] est basée sur la détection des frontières à partir de l'information de courbure et sur la croissance de régions. Un seuillage au niveau de tous les vertex est réalisé pour les associer à un label frontière ou à un label « germe ». Le seuil dépend de l'objet et de sa résolution. La croissance de région est ensuite initialisée à partir d'un vertex germe et ne s'arrête que lorsque le voisinage correspond à des vertex de frontières. Le procédé se répétera plusieurs fois avec un germe non labélisé.

Dans le cadre d'une application de *reverse-engineering*, [Meyer et Marin, 2004] ont proposé un algorithme de partitionnement du maillage le long des arêtes de la surface. Les contours des surfaces sont identifiés à partir des courbures fortes du maillage et du remplissage de surfaces spéciales appelées « absoïdes ». Deux modèles d'absoïde sont utilisés pour gérer les arêtes vives et les arêtes douces. La croissance de régions crée ensuite les différents carreaux à partir des contours.

[Zhang *et al.*, 2004] utilisent la décomposition de maillage par la croissance de régions pour approximer un modèle à partir de superquadriques (modèle de surface proposé par [Barr, 1981]). Les régions issues de la segmentation sont analysées pour déterminer les équations des superquadriques qui leur correspondent. Le procédé de segmentation fait intervenir la labellisation des vertex en type « frontière » ou « germe ». La croissance de régions est exécutée successivement sur les différents germes puis la fusion des petites régions ne conserve que les plus significatives.

[Mitani et Suzuki, 2004] proposent une méthode de segmentation de modèles 3D sous la contrainte que chaque région doit être « dépliable » (aplatie sans déformation). L'application correspond à la réalisation des schémas de découpe pour la conception d'objets en papier (*papercraft*). Leur algorithme est basé sur celui de [Lévy *et al.*, 2002] mais en considérant la génération de petites régions qui sont fusionnées à partir des étapes suivantes :

- sélection de la région ayant le plus petit nombre de triangles,

- calcul du nombre d'arêtes partagées par les régions adjacentes,
- fusion de la paire de régions ayant le nombre maximum d'arêtes en commun.

Ces trois étapes sont répétées tant qu'il existe une région ayant un nombre de faces inférieur à un seuil. Contrairement à l'approche de [Lévy *et al.*, 2002], il est possible d'obtenir des carreaux non-homéomorphes à un disque, ce qui est compatible avec leur application. Chaque région est ensuite décomposée en régions représentatives des carreaux en papier et les lignes de coupe sont affinées.

Un graphe de Reeb est une représentation graphique de la connectivité d'une surface entre ses points critiques. [Zhang *et al.*, 2005] ont porté les informations topologiques du graphe sur le maillage polygonal dans le but de localiser des zones caractéristiques. Leur méthode de segmentation se décompose en trois étapes : la réduction du genre, l'identification des caractéristiques et la création des carreaux. La croissance de région est utilisée pour chacune des étapes.

[Lavoué *et al.*, 2005b] ont proposé une méthode de segmentation basée sur la classification de sommets par rapport à leur courbure, sur la croissance de régions et la rectification des frontières suivant les directions des tenseurs de courbure (voir section 4.2). La classification des courbures regroupe dans des clusters les sommets de courbures semblables même si leur position dans l'espace est très différente. Une face triangulaire pourra être considérée comme germe si ses trois sommets appartiennent au même cluster ou si deux de ses sommets appartiennent au même cluster et que le troisième forme un angle aigu ou enfin si un sommet appartient au cluster et que ses deux autres sommets sont aigus. La croissance de régions va traiter le premier triangle germe (il n'est pas encore labellisé) et lui associer une région. Dès lors que la croissance aura été stabilisée pour cette région, le processus se répète avec un nouveau triangle germe. [Roudet *et al.*, 2007] proposent une segmentation multi-résolution à partir de la rugosité de la surface et de l'analyse en ondelettes. Le schéma de segmentation est basé sur la méthode de [Lavoué *et al.*, 2005b] mais l'information de courbure est remplacée par la mesure de rugosité.

Les travaux de [Min et Jung, 2006] portent sur la caractérisation de carreaux par rapport aux courbures principales. Des carreaux de forme convexes, concaves ou hyperboliques sont générés puis associés à une amplitude indiquant leur courbure.

Les travaux de [Carr *et al.*, 2006] concernent la paramétrisation de maillages. Ils font intervenir un partitionnement du maillage en carreaux rectangulaires en prenant garde de préserver la correspondance entre les texels (éléments de texture) le long des frontières des carreaux. La méthode est inspirée des travaux de [Sorkine *et al.*, 2002] et des approches itératives de [Sander *et al.*, 2003][Shlafman *et al.*, 2002][Cohen-Steiner *et al.*,

2004][Julius *et al.*, 2005]. Le procédé de partitionnement correspond à la définition de faces de type « germe » puis à la croissance de régions durant laquelle est vérifiée la distorsion des carreaux générés et sont corrigés la régularité des frontières ainsi que les trous dans les carreaux. Une métrique spécifique est utilisée pour encourager la formation de carreaux rectangulaires. Tant qu'un écart trop important est constaté entre les faces non attribuées, les carreaux sont réorientés puis la croissance de régions est répétée à partir des germes au terme de laquelle une nouvelle face « germe » est ajoutée. Les faces restantes sont ajoutées au carreau le plus proche.

[Mizoguchi *et al.*, 2006] ont récemment proposé une méthode de segmentation de maillages polygonaux scannés en surfaces analytiques à partir de l'estimation robuste de la courbure et de la croissance de régions. Ils mettent en œuvre une estimation de la courbure pour la détection d'arêtes vives et une croissance de régions non itérative pour déterminer les carreaux surfaciques. Ce procédé permet d'associer aux surfaces analytiques extraites des informations de haut niveau telles que le processus d'assemblage, l'extrusion linéaire de surface, les surfaces de révolution. La croissance de régions est initialisée à partir de germes issus d'une classification des courbures principales. Chaque vertex est associé à un label « plan », « cylindre », « sphère », « cône » ou « tore ». A chaque type de surface est affecté un seuil qui correspond au nombre maximum de vertex que pourra accepter la région germe. Une région germe est ensuite créée en considérant un ensemble de vertex connectés avec le même label et un seuil qui dépend du type de la surface.

La méthode de [Vieira et Shimada, 2005] repose sur un principe assez proche. A partir des courbures moyennes et gaussiennes filtrées, un label est attribué à chaque vertex en fonction des huit types fondamentaux de surface (voir figure 2.9). La proximité de

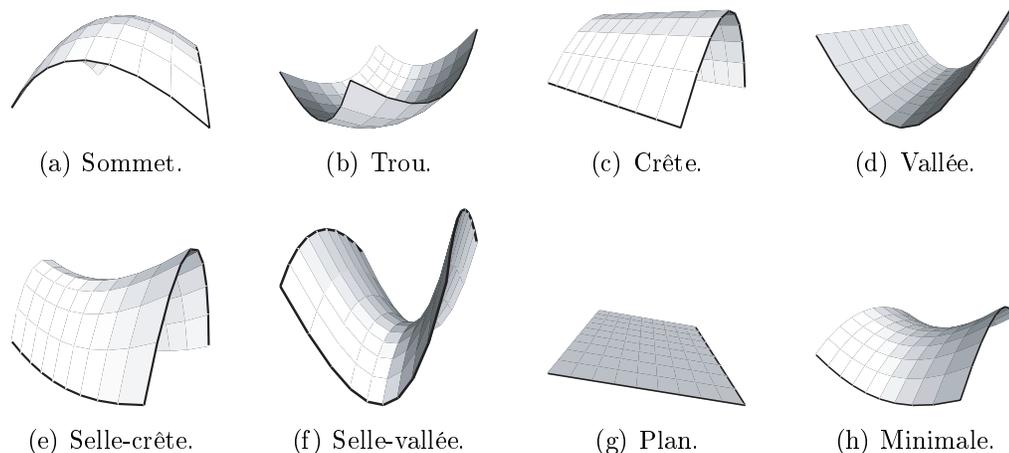


FIG. 2.9 – Les huit types fondamentaux de surface.

vertex de même label engendre des zones caractéristiques que l'algorithme va contracter pour déterminer des germes de la croissance de régions.

Le tableau 2.1 fait apparaître un résumé des caractéristiques et critères des méthodes de croissance de régions. Les caractéristiques communément utilisées correspondent à la courbure, à une primitive que la croissance de régions essaie d'approximer, à une distance aux contours. Les critères sont assez variés et interviennent dans des applications comme la paramétrisation, la segmentation d'objet de type C.A.O, la décomposition en parties significatives, etc.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Kalvin et Taylor, 1996]	Plan	Distance de planéité et d'orientation $L^\infty$
[Papaioannou <i>et al.</i> , 2000]	Plan	Orientation, aire, angle entre les plans
[Sorkine <i>et al.</i> , 2002]	Plan	Distorsion
[Carr <i>et al.</i> , 2006]	Forme rectangulaire	Correspondance entre texels, distorsion
[Mizoguchi <i>et al.</i> , 2006]	Primitive	Erreur d'approximation à une primitive
[Chazelle <i>et al.</i> , 1997]	Courbure	Convexité, taille de la région
[Zhang <i>et al.</i> , 2002]	Courbure gaussienne	Seuil au niveau de la courbure
[Meyer et Marin, 2004]	Courbure, absoïde	Taux de convergence, erreur de positionnement
[Zhang <i>et al.</i> , 2004]	Courbure gaussienne	Seuil au niveau de la courbure, marquage des vertex comme « région » ou « frontière »
[Vieira et Shimada, 2005]	Courbure gaussienne et moyennes, primitive	Nombre de vertex dans une région
[Min et Jung, 2006]	Courbure principale	Convexité, concavité, hyperbolicité
[Lavoué <i>et al.</i> , 2005b]	Courbure principale	Une face est ajoutée à une région en fonction du partitionnement des courbures principales

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Roudet <i>et al.</i> , 2007]	Rugosité	Une face est ajoutée à une région en fonction du partitionnement des rugosités
[Eck <i>et al.</i> , 1995]	Cellule de Voronoï	Homéomorphisme, un sommet peut être le point de rencontre de trois carreaux au maximum, deux carreaux se partagent au maximum une frontière
[Lévy <i>et al.</i> , 2002]	Contour, Distance aux contours	Position des discontinuités, homéomorphisme, distorsion
[Mitani et Suzuki, 2004]	Contour, Distance aux contours	Distorsion, nombre de triangles et d'arêtes, position des discontinuités
[Zhang <i>et al.</i> , 2005]	Iso-contour	Distorsion

TAB. 2.1 – Caractéristiques et critères des méthodes de croissance de régions.

### 2.3.2 La ligne de partage des eaux

La ligne de partage des eaux (LPE) est une méthode de segmentation largement utilisée sur les images 2D. La structure d'éléments connectés (vertex dans le cas de maillages polygonaux) est considérée comme un relief et chaque élément est positionné à une certaine hauteur. Ce relief est plongé progressivement dans de « l'eau » et des inondations sont simulées à partir des minima (vertex ou plateau n'ayant pas de voisin de niveau inférieur, voir figure 2.10). Des bassins d'eau se forment et lorsque deux bassins se rencontrent, une LPE est créée. Il existe une variante de cette méthode qui considère des

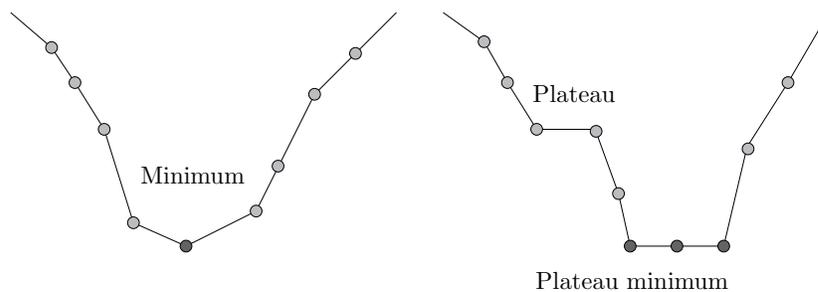


FIG. 2.10 – Minimum et plateaux.

marqueurs spécifiques comme source de l'inondation et non plus les minima. Le chapitre 3 détaille plus amplement le principe de la LPE et met en avant les récentes avancées. Nous discutons ici des principales méthodes de segmentation de maillages polygonaux utilisant la LPE.

L'algorithme simplifié 2 fait apparaître les étapes du processus de segmentation par ligne de partage des eaux avec l'utilisation des minima. Cet algorithme utilise des files d'attente hiérarchiques (FAH) pour gérer rapidement la simulation de la montée des eaux. A chaque file est associé un niveau de courbure. La priorité de traitement des files correspond au niveau de courbure le plus faible.

---

**Algorithme 2** : Ligne de partage des eaux
 

---

**début**

Calculer la courbure (ou une autre fonction de hauteur) pour chaque vertex  
 Déterminer les plateaux « minimum » et les plateaux « non minimum »  
 Trouver les minima locaux et attribuer à chacun un label différent  
 Insérer tous les vertex minima dans les files qui correspondent à leur niveau de courbure

**tant que** *la FAH n'est pas vide* **faire**

    Extraire un vertex  $x$  de la FAH

    Déterminer ses vertex voisins non étiquetés

**pour chaque** *voisin non étiquetés* **faire**

        Attribuer au voisin le même label que le vertex  $x$

        Insérer le voisin dans la FAH dans la file qui correspond à son niveau de courbure

**fin**

---

La contribution de [Mangan et Whitaker, 1999] sur la segmentation de maillages polygonaux par LPE est incontournable. Ils ont généralisé le principe de la LPE aux maillages polygonaux et ont proposé deux stratégies pour réaliser la LPE (Figure 2.11), l'approche « ascendante », qui consiste à inonder les minima jusqu'à ce que les bassins voisins se rencontrent, et l'approche « descendante », qui correspond au ruissellement d'une goutte d'eau le long de la pente la plus forte pour atteindre un minimum et ainsi labelliser le chemin qu'à parcouru la goutte. La courbure calculée par la norme de la matrice de covariance (cette méthode est abordée à la section 4.2) est utilisée comme fonction de hauteur de la LPE. Le résultat de la segmentation est souvent caractérisé par un nombre trop important de régions. Les marqueurs, le seuillage des régions ou encore la segmentation hiérarchique sont des solutions à ce problème de sur-segmentation. Mangan et Whitaker proposent d'utiliser un seuil au niveau de la profondeur de la LPE. Pour définir la hauteur d'une frontière, c'est-à-dire le potentiel de rassembler deux ré-

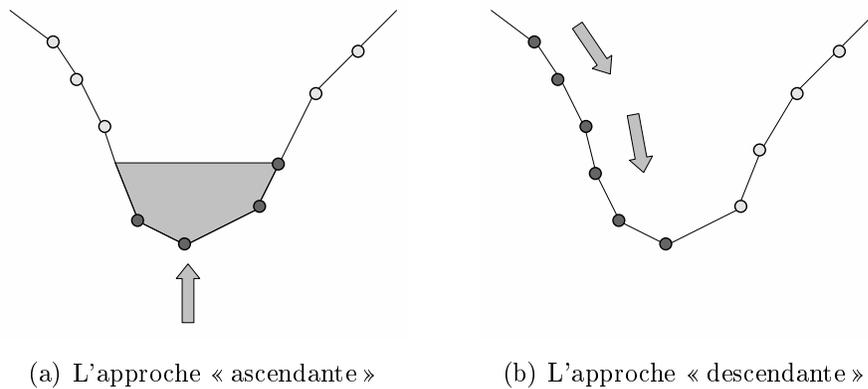


FIG. 2.11 – Deux approches de la ligne de partage des eaux.

gions ou de maintenir une séparation forte entre elles, la courbure du point le plus bas de la frontière (point selle ou point de crête) est généralement utilisée. Il apparaît cependant que cette information est beaucoup trop locale. La profondeur de la LPE fait intervenir une information supplémentaire qui correspond à la profondeur des bassins adjacents. Elle correspond à la différence entre la courbure du point selle et la profondeur minimum entre ses deux bassins adjacents. La figure 2.12 représente un relief composé de sommets reliés par des arêtes. La hauteur des sommets est définie par la courbure. Les points  $A$  et  $B$  sont les minima des bassins et  $S$  est le point selle de la frontière séparant les deux bassins.  $h_A$  et  $h_B$  correspondent respectivement à la profondeur des bassins de gauche et de droite. La profondeur de la LPE correspond ici à  $h_A$ .

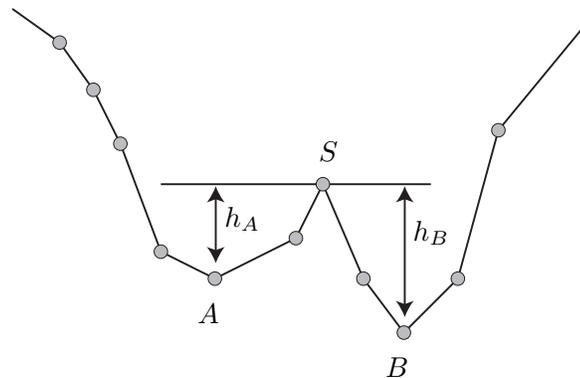


FIG. 2.12 – La profondeur de la LPE.

La méthode de [Pulla *et al.*, 2001] utilise la LPE avec une estimation améliorée de la courbure. Les améliorations ne portent pas sur la LPE en elle-même mais concernent l'estimation de la courbure. D'après les différentes expérimentations menées, la courbure absolue se révèle la plus efficace pour la segmentation.

[Sun *et al.*, 2002] ont proposé un algorithme de détection de contours et discutent de ses applications pour la segmentation et le lissage de surface. Ils font intervenir la distance géodésique pour caractériser le voisinage des vertex et calculer le niveau d'un contour. L'approche « descendante » de la LPE est ensuite utilisée pour réaliser la segmentation. Leur procédé détermine dans un premier temps les minima et attribue à chacun un label. Tous les vertex non labélisés opèrent une descente pour trouver une région labélisée. La fusion des régions dont la profondeur de LPE est inférieure à un seuil est ensuite réalisée. La détection des minima s'effectue suivant l'algorithme d'inondation de [Roerdink et Meijster, 2001] basé sur les files d'attente « FIFO ». Le procédé de descente est inspiré de l'algorithme de progression rapide (*fast marching*) [Sethian, 1999]. L'algorithme 11 de progression rapide est disponible page 125.

[Zuckerberger *et al.*, 2002] mettent en œuvre un algorithme de LPE (processus descendant) utilisant une fonction de hauteur par rapport aux arêtes du maillage. La LPE évolue non plus sur les vertex mais sur les arêtes. La fonction de hauteur  $h$  est définie par :

$$h = 1 - \cos \alpha \quad (2.3)$$

où  $\alpha$  est l'angle dièdre de l'arête (l'angle entre les deux faces adjacentes). La labellisation des faces associe à une face le label de son arête de hauteur la plus faible.

[Rettmann *et al.*, 2002] proposent une méthode de séparation des régions « sulcales » de la surface corticale à l'aide de la LPE et d'une fonction de hauteur relative à la distance aux régions « gyrales ». L'algorithme de [Kimmel et Sethian, 1998] est utilisé pour réaliser le calcul des distances géodésiques aux régions « gyrales ». Les points les plus éloignés de ces régions correspondent aux minima de la fonction de hauteur.

Une méthode hybride est présentée par [Razdan et Bae, 2003] : elle utilise la LPE et l'information de courbure au niveau de l'angle dièdre des arêtes. Les travaux proposés interviennent comme un complément de la méthode de Mangan et Whitaker en améliorant les frontières des régions. Dans un premier temps, les arêtes dont l'angle dièdre est supérieur à un seuil sont déterminées. Tous les vertex appartenant à des arêtes de ce type sont labélisés. Les triangles dont les vertex sont tous labélisés vont être subdivisés selon certains critères. La LPE est alors réalisée sur le nouveau maillage en affectant aux vertex labélisés une courbure maximale. Les arêtes qui contiennent ces vertex de courbure maximale garderont ainsi l'étiquette de contour de régions.

[Page *et al.*, 2003b] proposent une méthode de segmentation qui fait intervenir un algorithme de LPE par « ascension de colline » [Roerdink et Meijster, 2001], une carte directionnelle des hauteurs adaptée à la loi des minima et un ensemble d'opérations morphologiques pour améliorer les marqueurs de la LPE. Cette méthode de segmenta-

tion suit la loi des minima (voir 2.4.1), c'est-à-dire que le découpage des objets s'inspire de la décomposition des objets en parties réalisée par la perception humaine. La méthode est basée sur les approches de progressions rapides de [Kimmel et Sethian, 1998] pour définir les plus courts chemins géodésiques sur un maillage. L'inondation opérée par la LPE s'effectue ainsi de manière plus contrôlée. La LPE est initialisée avec des marqueurs définis à partir du filtrage des courbures principales positives et d'opérations morphologiques pour nettoyer les trous et les ouvertures.

[Atkar *et al.*, 2005] appliquent l'algorithme de LPE de Mangan et Whitaker en utilisant la courbure RMS [Pulla *et al.*, 2001] comme fonction de hauteur pour décomposer un maillage. L'application correspond à la peinture de zones spécifiques délimitées par de fortes courbures. Les contraintes de segmentation sont liées au procédé de peinture dont le coût est fonction de la forme de la surface.

Récemment, [Chen et Georganas, 2006] ont proposé une méthode de segmentation par LPE en utilisant des méthodes de progressions rapides. La spécificité de leur méthode est de pouvoir segmenter des modèles de haute résolution en utilisant un voisinage étendu de multi-anneaux qui est basé sur l'extraction de caractéristiques. Dans le cas d'un maillage basse résolution, le 1-voisinage est considéré. Pour les maillages haute résolution, le degré du voisinage peut être étendu jusqu'à 5. Le maillage est simplifié en reliant des vertex directement avec d'autres du dernier anneau du voisinage. L'approche « ascendante » de la LPE ainsi que la courbure gaussienne sont utilisées. Le schéma de segmentation correspond à l'érosion progressive des séparations entre les bassins. Pour éliminer les régions non significatives, deux critères sont considérés : la taille des régions et la longueur des frontières.

Les méthodes citées dans cette section utilisent différentes structures d'éléments connectés (vertex ou arêtes), des méthodes de LPE variées (ascension de colline, approche descendante, etc.), différentes fonctions de hauteur (courbure, loi des minima, etc.) et également des stratégies pour réduire la sur-segmentation. Comme nous pourrions le voir au travers des chapitres de ce manuscrit, il existe de nombreux outils issus du monde de la 2D qui peuvent s'adapter à celui des maillages polygonaux, notamment la fonction de distance et la segmentation hiérarchique basée sur les cascades et les dynamiques de contour. Nos travaux portent principalement sur la fonction de hauteur ainsi que la segmentation hiérarchique de maillages polygonaux en utilisant des méthodes basées sur la LPE. Notre première contribution [Betser *et al.*, 2005] concerne la segmentation hiérarchique en utilisant la LPE sans biais de [Beucher, 2004], le graphe de points selles et la méthode des cascades [Beucher, 1994]. L'algorithme de LPE de Beucher basé sur les files d'attente hiérarchiques représente un outil très efficace pour réaliser la simulation de la montée des eaux et la segmentation en prenant en compte l'approche par

minima ou par marqueurs. Pour contrôler la sur-segmentation, nous proposons d'utiliser les points selles issus de la segmentation par LPE et de générer un graphe en les connectant. L'algorithme des cascades est utilisé pour les différents niveaux de la segmentation hiérarchique à partir des régions et du graphe des points selles. Une version étendue de ces travaux a été proposée dans [Betser *et al.*, 2006].

Nous avons proposé dans [Delest *et al.*, 2006a] une méthode qui réalise la segmentation par LPE à partir du graphe dual du maillage. Une structure de faces connectées est considérée ; le calcul de la courbure au niveau de la face est réalisé à partir de la norme de la matrice de covariance en considérant l'ensemble des faces et pas seulement celles connectées par les arêtes de la face. Nous avons allégé le procédé de fusion en considérant un arbre dont les nœuds sont les profondeurs de la LPE. Le procédé de recherche du meilleur niveau de segmentation est devenu beaucoup plus rapide.

Pour limiter la recherche du meilleur niveau de fusion, nous avons proposé un nouvel algorithme de segmentation hiérarchique [Delest *et al.*, 2006b]. A partir des informations de profondeur de la LPE, les bassins qui peuvent s'inonder mutuellement sont définis comme des régions-germes labellisées. La fusion s'opère ensuite en considérant les bassins adjacents non fusionnés qui peuvent se déverser dans les régions déjà formées. Lorsque la fusion a fait se rencontrer deux régions labellisées, un verrou est posé sur ces deux régions qui ne pourront plus fusionner à cette étape. Le procédé est alors réitéré en considérant de nouveaux germes à partir des régions qui peuvent s'inonder mutuellement. Cette méthode permet de faire apparaître les niveaux les plus significatifs et de proposer, même dans le cas de maillage de haute résolution, un nombre relativement faible de niveaux à parcourir pour sélectionner la segmentation la mieux adaptée à l'application. Les dynamiques de contour font apparaître des frontières pertinentes. Nous avons utilisé ce critère à la place de la profondeur de la LPE dans [Delest *et al.*, 2007b] pour définir de nouvelles hauteurs de frontière.

Nos travaux concernent également la recherche de marqueurs pour la LPE [Delest *et al.*, 2006c][Delest *et al.*, 2007a]. Ces méthodes sont abordées un peu plus loin dans le cadre de la segmentation en parties significatives.

Le tableau 2.2 fait apparaître les différentes caractéristiques et critères utilisés pour les méthodes de LPE. La courbure de vertex est majoritairement utilisée comme fonction de hauteur. Pour supprimer la sur-segmentation, des procédés de seuillage ou de fusion sont généralement appliqués. Ces méthodes sont utilisées pour segmenter des objets de type C.A.O, des formes naturelles ou bien spécifiques [Rettmann *et al.*, 2002].

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Mangan et Whitaker, 1999]	Courbure (norme)	Fonction de hauteur, seuillage des profondeurs de la LPE
[Pulla <i>et al.</i> , 2001]	Courbure absolue, gaussienne, RMS et norme	Fonction de hauteur
[Sun <i>et al.</i> , 2002]	Énergie de contour	Fonction de hauteur, seuillage des profondeurs de la LPE
[Zuckerberger <i>et al.</i> , 2002]	Angle dièdre	Fonction de hauteur
[Rettmann <i>et al.</i> , 2002]	Distances aux régions « gyrales »	Fonction de hauteur, seuillage des profondeurs de la LPE
[Razdan et Bae, 2003]	Angle dièdre, courbure absolue	Fonction de hauteur relative à la courbure
[Page <i>et al.</i> , 2003b]	Courbure minimum, courbure normale	Fonction de hauteur, marqueurs
[Atkar <i>et al.</i> , 2005]	Courbure RMS	Fonction de hauteur, seuillage de la hauteur des points selles, carreaux topologiquement simples
[Chen et Georganas, 2006]	Courbure gaussienne	Fonction de hauteur, taille des régions, longueur des frontières
[Delest <i>et al.</i> , 2006a]	Courbure (norme face)	Fonction de hauteur
[Delest <i>et al.</i> , 2006b]	Courbure (norme vertex)	Fonction de hauteur, cascades
[Delest <i>et al.</i> , 2007b]	Courbure (norme vertex), dynamiques de contour	Fonction de hauteur, cascades

TAB. 2.2 – Caractéristiques et critères des méthodes de LPE.

### 2.3.3 Partitionnement hiérarchique

La recherche d'un optimum local peut conduire à un résultat global insatisfaisant. Le nombre de régions est fortement dépendant du nombre de germes pour la croissance de régions ou bien des minima (ou marqueurs) pour la LPE. La segmentation qu'offrent ces méthodes ou bien le maillage initial peuvent être utilisés comme le premier niveau d'une hiérarchie de segmentation. Les différentes régions sont fusionnées suivant certains critères jusqu'à la fusion de toutes les régions. L'algorithme 3 décrit le schéma général

du partitionnement hiérarchique.

---

**Algorithme 3** : Partitionnement hiérarchique
 

---

**début**

  Initialiser une file d'attente  $Q$

  Insérer toutes les paires de régions adjacentes

**tant que**  $Q \neq \emptyset$  **faire**

    Retirer la première paire  $\{u, v\}$  de  $Q$

**si** la paire de régions  $\{u, v\}$  peut être fusionnée **alors**

      Fusionner  $\{u, v\}$  dans  $w$

      Mettre à jour les couples liés à  $w$  dans  $Q$

**sinon**

      Insérer  $\{u, v\}$  dans  $Q$

**fin**

---

A partir des différentes régions créées par une méthode de segmentation, les paires de régions adjacentes disposent d'un coût qui représente leur potentiel de fusion. Les régions sont alors fusionnées dans un ordre relatif au coût le plus faible.

[Garland *et al.*, 2001] utilisent la distance  $L^2$  et la norme de l'orientation par rapport à des plans représentatifs. Les auteurs font intervenir la mesure de la planéité, la métrique d'erreur quadratique et mettent en relief différents biais. Le fait de regrouper des vertex qui semblent appartenir au même plan n'assure pas que toutes les normales des faces du cluster seront orientées de façon cohérente (voir figure 2.13). Certaines applications comme la simplification nécessitent des clusters de formes simples et compactes. Pour garantir une certaine compacité, Garland *et al.* ont utilisé un critère d'irrégularité défini par :

$$\gamma = \frac{\rho^2}{4\pi w} \quad (2.4)$$

où  $\rho$  correspond au périmètre et  $w$  à l'aire. Pour décider si deux clusters  $C_1$  et  $C_2$  peuvent fusionner par rapport à la contrainte de forme, une pénalité de la forme suivante est utilisée :

$$E_{forme} = \frac{\gamma - \max(\gamma_1, \gamma_2)}{\gamma} \quad (2.5)$$

avec  $\gamma$ , l'irrégularité du nouveau cluster formé par les deux clusters qui peuvent fusionner et  $\gamma_1, \gamma_2$ , l'irrégularité des clusters 1 et 2. L'erreur d'ajustement par rapport au plan est ensuite combinée à l'erreur d'orientation et l'erreur de forme pour définir le coût de fusion de deux clusters :

$$E = E_{plan} + E_{orientation} + E_{forme} \quad (2.6)$$

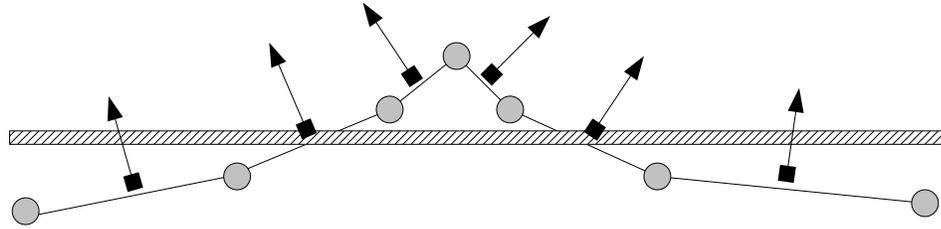


FIG. 2.13 – Le biais d'orientation.

[Sander *et al.*, 2001] utilisent un schéma de segmentation similaire à celui présenté précédemment. Un cluster est attribué à chaque face du maillage. Les paires de régions candidates sont rangées dans une file d'attente en fonction de leur coût. La fusion n'est pas autorisée s'il en résulte un cluster de moins de 3 coins ou si le cluster n'est pas homéomorphe à un disque, c'est-à-dire s'il n'existe pas au moins un vertex isolé entouré d'un chemin d'arêtes frontières. Une fois tous les clusters identifiés, la rectification des frontières est réalisée à l'aide d'un algorithme de recherche du plus court chemin.

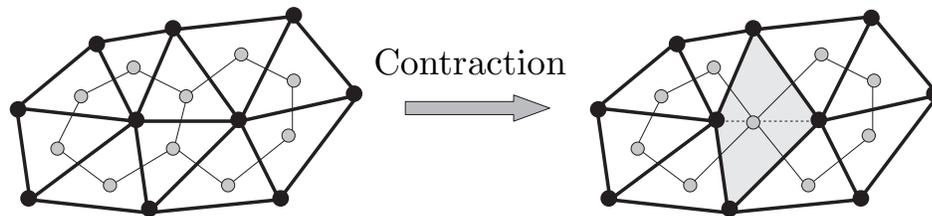


FIG. 2.14 – Contraction d'une arête du graphe dual du maillage.

[Inoue *et al.*, 2001] réalisent le partitionnement hiérarchique du maillage en considérant le graphe dual du maillage, c'est-à-dire un ensemble de faces avec des liens d'adjacence. Les arcs qui lient une paire de faces sont étiquetés comme « interne » ou « frontière ». Chaque paire de faces non marquée est candidate pour la fusion. Comme caractéristiques significatives d'une région, l'aire, la régularité des frontières et la planéité sont privilégiées. L'algorithme de fusion traite prioritairement les paires de régions qui ont le meilleur score de fusion. La fusion est réalisée en contractant l'arête d'adjacence qui relie deux régions (voir figure 2.14). Le procédé du choix de la meilleure paire de régions en fonction de son score de fusion et le procédé de contraction sont répétés tant qu'il existe des régions qui peuvent potentiellement fusionner.

L'algorithme de partitionnement proposé par [Sheffer, 2001] repose sur le principe de contraction du graphe d'adjacence. L'application correspond à la simplification de maillages polygonaux sur des modèles de CAO. La contraction est réalisée à partir d'une mesure d'attraction directionnelle de cluster basée sur les informations suivantes :

- Arête non contractable : les maillages non manifold autorisent le partage d'arêtes par plus de deux faces. Ces arêtes sont considérées comme non contractables.
- Préservation des frontières : les frontières de deux régions qui s'apprêtent à fusionner ne doivent pas être trop importantes. Les angles dièdres des arêtes de la frontière ne doivent pas être inférieurs à un certain seuil.
- Taille des régions : l'attraction d'une petite région par une grande région est privilégiée. La cohérence de cette fusion est contrôlée par le rapport de l'aire de la petite région sur la longueur de la frontière séparant les deux régions.
- Forme des frontières : cet indice favorise la création de régions simples, c'est-à-dire le regroupement de deux régions qui se partagent une longue frontière et qui ont un angle de contact obtu.
- Planéité : les normales de chacune des faces d'un cluster sont analysées pour caractériser la planéité du cluster.

[Gelfand et Guibas, 2004] utilisent l'analyse du glissement local pour déterminer les différents mouvements de glissement qui pourront être associés à plusieurs types de surface (la sphère, le plan, le cylindre, une extrusion linéaire, une surface de révolution et une hélice). Chaque élément du maillage est associé à un type de surface. L'initialisation du procédé de segmentation correspond au calcul du score de similarité entre chaque paire adjacente de carreaux. Les paires sont rangées dans une liste où celles ayant le meilleur score sont les plus prioritaires. Les paires sont successivement retirées de la liste pour être fusionnées. Les carreaux résultant de la fusion subissent une nouvelle analyse du glissement local et sont confrontés aux carreaux adjacents pour définir de nouvelles paires. Ces dernières seront rangées dans la liste en fonction de leur score de similarité. Un seuil du score de similarité peut être utilisé pour stopper le procédé de fusion.

[Kima *et al.*, 2006] réalisent la segmentation en trois principales étapes. L'algorithme commence par calculer, pour chaque paire de triangles adjacents, un coût représenté par la différence entre les normales de chaque triangle. Les paires de triangles sont ensuite rangées dans une liste en fonction du coût le plus faible. Les triangles des paires dont le coût est inférieur à un seuil sont fusionnés. Le procédé est réitéré en considérant cette fois-ci des paires de régions ainsi qu'un coût relatif à la différence des normales moyennes des régions. Les frontières sont ensuite lissées.

La méthode proposée par [Attene *et al.*, 2006a] est une variante de celle de [Garland *et al.*, 2001]. L'ajustement des carreaux n'est plus obligatoirement réalisé par rapport à un plan mais par rapport à plusieurs primitives que sont le plan, la sphère et le cylindre. Le coût pour fusionner un ensemble de triangles dans un cluster représentatif correspond à l'erreur minimale d'ajustement par rapport aux différentes primitives. La structure

de l'algorithme est semblable à celle proposée par Garland *et al.* Chaque arc dual est retiré de la file d'attente puis est contracté; la file d'attente est ensuite mise à jour. La modification intervient au niveau du coût de chaque arc dual qui est influencé par l'erreur d'ajustement à la primitive la plus proche. Pour déterminer le plan représentatif d'un ensemble de triangles, la méthode classique d'analyse en composantes principales [Garland *et al.*, 2001][Cohen-Steiner *et al.*, 2004] est utilisée. L'erreur d'ajustement  $L^2$  (pondérée) est :

$$L^2 = \sum_{i=1}^k a(v_i) (n(v_i - \bar{v}))^2 \quad (2.7)$$

avec  $a(v)$  l'aire de Voronoï restreinte [Meyer *et al.*, 2003] autour du vertex  $v_i$  et  $\bar{v}$  le centre de gravité de l'ensemble des vertex du cluster. La normale  $n$  correspond au vecteur propre lié à la valeur propre minimum de la matrice de covariance des vertex du cluster. L'ajustement par rapport à la sphère est réalisé en déterminant les paramètres du centre et du rayon par la méthode des moindres carrés. Soit  $P$ , un ensemble de points  $(x_i, y_i, z_i)$  et  $(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 + (z - c_z)^2 - r^2 = 0$ , l'équation implicite de la sphère  $S$  de rayon  $r$  et centrée en  $c = (c_x, c_y, c_z)$ . La distance euclidienne d'un point  $p_i$  à la sphère correspond à :

$$d(p_i, S) = \sqrt{(x_i - c_x)^2 + (y_i - c_y)^2 + (z_i - c_z)^2} - r \quad (2.8)$$

Au sens des moindres carrés, l'ajustement à la sphère d'un ensemble de points  $P$  revient à déterminer le centre  $(c_x, c_y, c_z)$  et le rayon  $r$  qui minimisent la somme de toutes les distances au carré :

$$\min \left( \sum_{i=1}^k d^2(p_i, S) \right) \quad (2.9)$$

A partir des paramètres  $c$  et  $r$  de la sphère, l'erreur d'ajustement  $L^2$  peut s'exprimer sous la forme :

$$L^2 = \sum_{i=1}^k a(v_i) (\|v_i - c\|_2 - r)^2 \quad (2.10)$$

L'ajustement par rapport à un cylindre est réalisé à partir du rayon  $r$ , du vecteur unitaire  $n$  parallèle à l'axe et du centre  $c$  du cylindre. L'erreur d'ajustement  $L^2$  correspond dans ce cas à :

$$L^2 = \sum_{i=1}^k a(v_i) (\|(v_i - c) \cdot n\|_2 - r)^2 \quad (2.11)$$

La segmentation au sens du mouvement de maillages dynamiques est abordée dans [Mamou *et al.*, 2007b] pour gérer des animations à la fois articulées et élastiques. Cette segmentation est exploitée dans l'étape de compensation de mouvement (modélisation fidèle du champ de mouvement avec un nombre réduit de carreaux) par le codeur

d'animation 3D FAMC [Mamou *et al.*, 2007a]. Le partitionnement hiérarchique est réalisé sous la contrainte d'erreur quadratique moyenne de compensation de mouvement. Leur article fait suite à [Mamou *et al.*, 2006b] où le partitionnement est itératif et dont le principal inconvénient provient du nombre de régions à préciser par l'utilisateur. Une stratégie de décimation privilégiant la simplification de sommets ayant le même mouvement affine est utilisée.

Le tableau 2.3 fait apparaître les différentes caractéristiques et les critères utilisés pour les méthodes de partitionnement hiérarchique. Le procédé de contraction d'arête du graphe dual est généralement utilisé pour réaliser la fusion à partir du critère spécifié. Les caractéristiques sont associées à une primitive dans la plupart des cas. Le procédé de fusion traite toujours en premier le couple de face dont le coût de fusion est le plus faible. Les critères de fusion utilisent souvent l'erreur d'approximation à une primitive.

Les applications concernées par ce type de méthode sont la simplification, la segmentation d'objet de type C.A.O, le plaquage de texture, etc.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Garland <i>et al.</i> , 2001]	Plan, normale	Planéité, orientation, compacité, irrégularité
[Sander <i>et al.</i> , 2001]	Plan	Déformation de la texture, planéité, compacité
[Inoue <i>et al.</i> , 2001]	Plan, aire et périmètre des régions, normale	Taille de l'aire, niveau de lissage des frontières, planéité
[Sheffer, 2001]	Plan	Planéité, longueur des arêtes, angle entre les régions, taille des régions, angle dièdre
[Gelfand et Guibas, 2004]	Mouvement de glissement	Similarité du type de surface
[Kima <i>et al.</i> , 2006]	Normale, angle	Différence d'angle entre les faces, différence d'angle entre les régions, taille des régions
[Attene <i>et al.</i> , 2006a]	Plan, sphère, cylindre	Similarité à une primitive
[Mamou <i>et al.</i> , 2007a]	Mouvement	Nombre de carreaux, erreur quadratique moyenne de compensation de mouvement

TAB. 2.3 – Caractéristiques et critères des méthodes de partitionnement hiérarchique.

### 2.3.4 Partitionnement itératif

La recherche d'une segmentation optimale peut être approchée par la recherche itérative du meilleur partitionnement à partir d'un nombre fixé de clusters. Le support d'une telle approche correspond à l'algorithme des *k-means* (souvent associé à l'algorithme de quantification de [Lloyd, 1982]). Le procédé itératif commence avec  $k$  classes, chacune disposant d'un centroïde représentatif. Les éléments du maillage sont successivement associés aux classes qui leur correspondent le mieux. Un ajout d'élément dans une classe implique la mise à jour du centroïde de la classe lorsque tous les éléments ont été assignés. Le partitionnement est terminé lorsque les classes sont stabilisées.

---

**Algorithme 4** : Partitionnement itératif
 

---

**début**

    Initialiser  $k$  classes

**tant que** la stabilité des classes n'est pas atteinte **faire**

**pour chaque** élément  $s$  du maillage **faire**

            Trouver la classe  $i$  la plus adaptée à  $s$

            Assigner  $s$  à cette classe

**pour chaque** classe  $i$  **faire**

            Mettre à jour le centroïde de la classe

**fin**

---

[Shlafman *et al.*, 2002] ont proposé une méthode de partitionnement de faces basée sur l'algorithme des *k-means*, destinée à une application de métamorphose. L'idée est de créer des segmentations compatibles pour les deux objets à transformer. Pour décider si deux faces adjacentes peuvent appartenir au même carreau, ils utilisent une approximation de la distance géodésique et la distance angulaire. La distance entre la face  $F_1$  et la face  $F_2$  est ainsi mesurée :

$$distance(F_1, F_2) = (1 - \delta)(1 - \cos^2(\alpha)) + \delta \cdot D_p(F_1, F_2) \quad (2.12)$$

avec  $\alpha$ , l'angle dièdre entre les faces,  $\delta$ , un coefficient qui favorise l'une des deux distances et  $D_p$ , une approximation de la distance géodésique qui correspond à la somme des distances entre les centres de gravité des deux faces et le point-milieu de l'arête commune. Cette définition de distance est étendue à des faces non-adjacentes :

$$distance(F_1, F_2) = \min_{F_3 \neq F_1, F_2} (distance(F_3, F_1) + distance(F_3, F_2)) \quad (2.13)$$

où  $F_1$  et  $F_2$  sont deux faces non adjacentes et  $F_3$ , une face adjacente ou non à  $F_1$  et  $F_2$  qui peut entraîner le calcul récursif de la distance par rapport aux équations 2.12 et 2.13.

L'algorithme réalise itérativement l'amélioration de la décomposition en transférant les faces d'un carreau à un autre par rapport à cette distance. Après que les représentants des classes aient été choisis, chaque face est attribuée au cluster ayant le représentant le plus proche. Les nouveaux représentants correspondent aux faces qui minimisent la somme des distances à toutes les autres faces dans le cluster.

[Sander *et al.*, 2003] utilisent une décomposition par carreaux pour des applications de paramétrisation. Partant du constat de la limitation de la méthode de Shlafman *et al.* pour le traitement des frontières fortes pour un petit nombre de carreaux, ils ont développé une approche alternative basée sur la croissance simultanée des carreaux en utilisant l'algorithme de Dijkstra sur le graphe dual du maillage. Un coût relatif à la planéité du carreau et à la compacité des frontières est attribué à chaque arc du graphe dual. Le coût d'un arc qui relie la face  $F$  du cluster  $C$  à une face  $F'$  adjacente à  $F$  est défini par la mesure de la distance géodésique entre les deux faces et par la différence entre la normale de  $F'$  et la normale représentative de  $C$  :

$$\text{coût}(F, F') = (\lambda - (N_C \cdot N_{F'})) \cdot (|P_{F'} - P_F|) \quad (2.14)$$

où  $P_{F'}$  et  $P_F$  correspondent aux centres de gravité respectifs de  $F'$  et de  $F$ ,  $N_C$  à la normale du cluster  $C$  (la moyenne de toutes les normales des faces contenues dans  $C$ ) et  $N_{F'}$  à la normale de  $F'$ . Le paramètre  $\lambda$  régule le poids du coût de la distance entre les normales par rapport au coût de la distance géodésique. La face située le plus au centre d'un cluster en est le meilleur représentant. La recherche de cette face est réalisée à partir de l'algorithme de Dijkstra en prenant comme point de départ toutes les faces adjacentes aux frontières du cluster. Les différentes recherches évoluent en parallèle et la dernière face visitée correspondra à celle la plus au centre. Le coût des arcs correspond à une approximation de la distance géodésique :

$$\text{coût}(F, F') = |P_{F'} - P_F| \quad (2.15)$$

Le procédé démarre avec un seul cluster qui est initialisé avec un germe choisi au hasard. La croissance est réalisée sur l'intégralité du maillage et la dernière face visitée servira de germe pour la croissance du second cluster, ce qui assure un éloignement maximal entre les clusters. Le procédé est réitéré tant que le nombre désiré de clusters n'est pas atteint.

[Katz et Tal, 2003] ont proposé un algorithme hybride qui utilise le partitionnement itératif et la coupe de graphe. La première décomposition est réalisée à partir du partitionnement itératif en considérant les carreaux les plus significatifs. Ils ne définissent pas encore de frontières exactes et laissent une zone de flou autour des frontières. Ce procédé peut s'apparenter à l'attribution à chaque face d'une probabilité d'appartenir à chaque carreau. Une décomposition floue est ensuite appliquée en ajustant les probabilités avec un schéma de partitionnement itératif. La décomposition floue est alors

transformée en segmentation finale où des frontières exactes sont définies entre les composants. Le schéma de décomposition se présente sous deux formes : la décomposition binaire, où le maillage peut être successivement subdivisé en deux sous-maillages et la décomposition « *k-way* », qui correspond à une généralisation de la décomposition binaire.

[Cohen-Steiner *et al.*, 2004] ont mis en œuvre une méthode de segmentation sur un maillage triangulaire découpée en deux phases. A partir du partitionnement géométrique obtenu par une croissance de régions contrôlée par la minimisation de l'erreur, un représentant local optimal est calculé pour chaque région. Ces représentants, qui minimisent l'erreur de distorsion pour une partition donnée, sont une extension des centroïdes de l'algorithme original de Lloyd. Le procédé d'initialisation proposé correspond au choix aléatoire de  $k$  triangles. Les plans représentatifs des triangles sont définis à partir du barycentre du triangle et de sa normale. A partir des triangles germes, la croissance de régions est lancée. Pour chaque triangle germe  $T_i$ , les triangles  $T_j$  adjacents par les arêtes sont insérés dans une file d'attente globale dont la priorité est relative à l'erreur de distorsion par rapport au plan représentatif  $i$ . Les triangles insérés sont étiquetés temporairement avec le label du plan  $i$ . La file d'attente peut contenir plusieurs fois le même triangle mais avec un label différent. Le triangle ayant la plus faible erreur de distorsion sera le premier retiré de la file d'attente. Si un triangle est retiré de la file d'attente et qu'il a déjà un label définitif, il n'est pas traité ; si le label n'est que temporaire, le triangle est associé au plan représentatif dont il partage le label et ses faces directement adjacentes sont insérées avec le même label. Une fois que l'attribution de tous les triangles a été réalisée, les plans représentatifs  $P_i = (X_i, N_i)$  sont mis à jour par rapport à leur région associée. Les auteurs comparent les deux métriques  $L^2$  et  $L^{2,1}$  et mettent en évidence les avantages de  $L^{2,1}$  qui permet une meilleure capture de l'anisotropie de la surface et une recherche plus rapide et plus efficace qu'avec  $L^2$ . Pour éviter que l'algorithme de recherche de la plus faible distorsion soit bloqué dans un minimum local, un procédé de « téléportation » de régions est utilisé : une région est supprimée puis une nouvelle est ajoutée à l'endroit qui en a le plus besoin.

La segmentation d'un maillage en utilisant la tessellation centroïdale géodésique est proposé dans [Peyré et Cohen, 2004]. Cette méthode, qui fait intervenir la segmentation de Voronoï centroïdale, peut prendre en compte l'information de courbure et de texture. Les régions du maillage sont découpées par rapport aux propriétés saillantes de la surface et à la compacité des régions. Un compromis est réalisé pour intégrer ces deux contraintes en approchant itérativement la solution avec l'algorithme de Lloyd.

[Wu et Kobbelt, 2005] proposent une extension de [Cohen-Steiner *et al.*, 2004] en intégrant des approximations à de nouvelles primitives telles que la sphère, le cylindre et

des carreaux courbés contrôlés par des boules de commandes (*rolling-balls*). Un carreau courbé est définie avec  $B_i = (c_i(t), r_i)$  où  $c_i(t)$  correspond au centre de la trajectoire et  $r_i$  au rayon de la boule de commande liée au carreau. L'approximation de la surface du carreau est réalisée à l'aide de courbes B-splines. Le schéma itératif est proche de la méthode de [Cohen-Steiner *et al.*, 2004]; tous les carreaux sont associés à un plan, la création de carreaux de forme sphérique ou cylindrique est ensuite autorisée puis l'approximation par rapport à un carreau courbé est finalement réalisée.

L'approche de [Simari et Singh, 2005] correspond à des ajustements successifs par rapport à des ellipsoïdes. Les étapes de classification et d'ajustement sont successivement appliquées. Pour l'ajustement, chaque primitive ellipsoïde  $P_i$  est mise à jour avec celle qui minimise la fonction d'erreur  $E(R_i, P_i)$  par rapport à la surface  $R_i$ . Durant l'étape de classification, les régions  $R_i$  sont recalculées et chaque face  $f_j$  est attribuée à la région qui minimise l'erreur  $E(f_j, P_i)$  sous la contrainte que les régions doivent rester connectées.

[Yamauchi *et al.*, 2005b] utilisent l'estimation non paramétrique par noyau (*mean shift*) pour partitionner les normales du maillage. La segmentation s'opère dans l'espace des caractéristiques et consiste à réaliser une croissance de régions itérative basée sur le calcul des plus courts chemins à partir des germes et sur l'optimisation des germes par l'algorithme de Lloyd.

[Yamauchi *et al.*, 2005a] proposent une segmentation guidée par la courbure gaussienne. Ils utilisent l'aire gaussienne calculée pour un vertex, une arête ou un triangle. Leur méthode est basée sur l'algorithme de croissance itérative de Lloyd et favorise une aire gaussienne équivalente dans les carreaux. Deux files d'attente sont utilisées pour déterminer le prochain carreau qui va croître en fonction de l'aire gaussienne ainsi que le prochain triangle à ajouter au carreau. Les carreaux sont régulés parallèlement afin d'éviter une croissance trop rapide.

[Marinov et Kobbelt, 2006] se sont basés sur la méthode de [Cohen-Steiner *et al.*, 2004] en apportant des modifications sur leur algorithme. Ils estiment dans un premier temps la qualité globale de la segmentation. Chaque téléportation de régions est évaluée et acceptée si l'amélioration est effective. Si la téléportation est rejetée, quelques itérations de relaxation sont réalisées jusqu'à ce qu'un nouveau minimum local soit trouvé.

[Choe *et al.*, 2006] offre une méthode de segmentation de modèles de haute résolution suivant le schéma des *k-means*. Les germes de la croissance de régions sont définis par subdivision spatiale. Les germes centroïdes des carreaux sont mis à jour à chaque itération des *k-means*. Pour intégrer les contraintes d'occupation mémoire qui peuvent

interdire de traiter le maillage dans sa globalité, la croissance de régions est réalisée à un niveau local. La convergence étant plus difficile à atteindre que dans le cas global, un ratio de « mise à jour » est utilisé. Il sert à limiter le nombre d'itérations et influence l'ordre de traitement des carreaux.

[Lai *et al.*, 2006] orientent leur segmentation par rapport à l'information de texture (pas au sens d'images qui peuvent être plaquées sur le modèle mais au sens de motifs de forme). Un pré-traitement est d'abord appliqué : chaque point  $x$  de la surface est associé à un point correspondant  $x_f = (x, w \cdot n)$  dans  $\mathbb{R}^6$ , où  $n(x)$  est le vecteur normal unitaire correspondant à  $x$  et  $w$  une constante définie par l'utilisateur qui règle la sensibilité des caractéristiques [Lai *et al.*, 2007]. Il en résulte une surface  $\Phi \subset \mathbb{R}^3$  qui correspond au maillage 2-manifold  $\Phi_f \subset \mathbb{R}^6$ . Des invariants intégraux [Manay *et al.*, 2004] sont utilisés localement pour estimer les propriétés locales de la surface qui apparaissent plus robuste que l'angle dièdre entre deux faces adjacentes ou la courbure discrète. L'estimation des normales est réalisée par rapport au 1-voisinage mais dans le cas de surfaces bruitées, la normale du plan ou bien de la surface quadratique estimée à partir d'un certain voisinage [Lai *et al.*, 2007] sont utilisées. Le schéma de segmentation se résume à déterminer la hiérarchie des caractéristiques du maillage puis à appliquer l'algorithme des *k-means* sur le maillage avec une certaine métrique puis à lisser les frontières. Le coût associé à chaque paire de triangles adjacents est lié à une métrique qui combine la distance géodésique, la courbure et l'information de texture. Les germes peuvent être définis en choisissant un premier germe au hasard puis en ajoutant successivement des germes en fonction de l'éloignement maximum aux germes déjà existant, jusqu'à atteindre le nombre de clusters désiré. Un triangle sera affecté à son plus proche cluster en fonction de son coût. La mise à jour du représentant du cluster est réalisée en considérant la face la plus à l'intérieur du cluster. Le procédé d'affectation et de mise à jour se réitère jusqu'à la stabilité du système.

[Kraevoy *et al.*, 2006] réalisent la décomposition du maillage en carreaux convexes et compactes. Leur métrique de convexité utilise la distance entre un carreau  $P$  et sa forme convexe correspondante  $C(P)$ . La distance est définie par l'aire pondérée moyenne des distances des triangles  $t$  du carreau à la forme convexe :

$$dist(P, C(P)) = \frac{\sum_{t \in P} dist(t, C(P)) \cdot a(t)}{\sum_{t \in P} a(t)} \quad (2.16)$$

où  $a(t)$  représente l'aire du triangle  $t$  et  $dist(t, C(P))$  la distance du triangle  $t$  à la forme convexe  $C(P)$  par rapport à la direction de la normale du triangle. La compacité est relative à l'aire  $a(C)$  et au volume  $v(C)$  de la forme convexe. Elle est définie par :

$$comp(C) = \frac{a(C)}{v(C)^{\frac{2}{3}}} \quad (2.17)$$

La fonction de coût est alors représentée par :

$$\text{coût}(P) = (1 + \text{dist}(P, C(P))) \cdot (1 + \text{comp}(C(P)))^\alpha \quad (2.18)$$

où  $\alpha$  est un paramètre qui privilégie l'une des deux métriques. La création des carreaux est réalisée à partir d'une variante du schéma itératif de Lloyd. Le nombre de carreaux n'est pas fixé manuellement mais déterminé automatiquement à partir d'un seuil au niveau de la forme convexe. La première étape de la segmentation consiste à calculer la coque convexe de l'objet. Le triangle le plus proche de la coque convexe correspond au premier germe de la croissance de régions et devient l'unique composant du premier carreau. Les vertex adjacents au carreau sont successivement ajoutés tant que l'erreur de convexité est inférieure à un seuil. Chaque modification du carreau entraîne la mise à jour de la coque convexe. Lorsque le carreau est stabilisé, de nouveaux germes sont calculés sur le carreau existant et les carreaux potentiels. Le procédé de croissance de régions est de nouveau exécuté. La recherche de nouveaux germes et la croissance de régions se répètent jusqu'à ce qu'au moins 95% des triangles contenus dans les carreaux soient identiques à ceux de l'itération précédente en terme d'appartenance aux classes.

Une méthode variationnelle pour l'extraction de surfaces quadriques à partir d'un maillage polygonal est proposé dans [Yan *et al.*, 2006]. Leurs travaux se positionnent comme une extension aux précédentes méthodes variationnelles qui sont limitées à la mise en correspondance avec un plan [Cohen-Steiner *et al.*, 2004] ou bien à des types particuliers de surfaces quadriques telles que la sphère, le cylindre, etc. [Wu et Kobbelt, 2005]. La méthode généralise le procédé de mise en correspondance pour intégrer une plus grande variété de quadriques. Yan et al. mettent en avant la distance Euclidienne d'une face triangulaire à une quadrique pour réaliser la mise en correspondance. Pour lisser les frontières irrégulières, un procédé de minimisation d'énergie basé sur la coupe minimale (*graph cut*) est utilisé.

[Bergou *et al.*, 2007] ont proposé un procédé appelé *tracking* qui prend en entrée une animation ou une simulation pour en améliorer la visualisation par l'ajout d'effets naturels simulés à partir de lois physiques. Le procédé fait intervenir une méthode de segmentation prenant en compte le temps, basée sur [Cohen-Steiner *et al.*, 2004], qui découpe le maillage en carreaux selon une mesure de distorsion entre un triangle  $T_j$  et un plan représentatif  $P_k$  définie par :

$$E(T_j, P_k) = \sup_{t \in t_0, t_1} A_j(t) \left( \frac{\mu}{A(t)} \|x_j(t) - x_k(t)\|^2 + (1 - \mu) \|n_j(t) - n_k(t)\|^2 \right) \quad (2.19)$$

où  $x_j(t)$  et  $x_k(t)$  sont respectivement les centroïdes de  $T_j$  et de  $P_k$ ,  $n_j(t)$  et  $n_k(t)$  sont respectivement les normales unitaires de  $T_j$  et de  $P_k$ ,  $A_j(t)$  et  $A(t)$  sont respectivement

les aires de  $T_j$  et de la surface totale du maillage. L'utilisateur règle le coefficient  $\mu \in [0, 1]$  selon qu'il souhaite privilégier la compacité ou la planéité.

Le tableau 2.4 fait apparaître les différentes caractéristiques et les critères utilisés pour les méthodes de partitionnement itératif. Les critères des méthodes sont associés à une erreur d'approximation à une primitive ou une fonction de distance relative à différents paramètres spécifiques à une application. Les caractéristiques sont assez variées et correspondent à la distance géodésique, l'angle dièdre, la normale, certaines primitives (plan, sphère, cylindre, ellipsoïde, coque convexe, quadrique, etc.), la courbure, la texture, le diagramme de Voronoï, la distorsion, etc.

Ces méthodes sont généralement bien adaptées pour des applications comme la simplification, la compression, la paramétrisation, la segmentation en parties significatives, etc.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Shlafman <i>et al.</i> , 2002]	Distance géodésique, angle dièdre	Fonction de distance définie à partir de la distance géodésique et de l'angle dièdre
[Sander <i>et al.</i> , 2003]	Normale, distance géodésique	Fonction de distance définie à partir de la distance géodésique et de la différence entre la normale d'une face et la normale d'un cluster
[Katz et Tal, 2003]	Distance géodésique, angle dièdre	Fonction de distance définie à partir de la distance géodésique, de l'angle dièdre et de la probabilité d'appartenance à un carreau,
[Cohen-Steiner <i>et al.</i> , 2004] [Marinov et Kobbelt, 2006] [Bergou <i>et al.</i> , 2007]	Plan	Planéité, distance $L^{2,1}$ , compacité
[Peyré et Cohen, 2004]	Courbure, texture, diagramme de Voronoï	Planéité, rapport aire / périmètre des régions
[Wu et Kobbelt, 2005]	Plan, sphère, cylindre, boule de commande	Distance $L^2$

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Simari et Singh, 2005]	Ellipsoïde	Erreur d'approximation à l'ellipsoïde à partir de la distance euclidienne, la courbure, l'angle formé par la normale du vertex et celle définie à partir du projeté sur l'ellipsoïde, le volume de l'ellipsoïde
[Yamauchi <i>et al.</i> , 2005b]	Normale, angle dièdre amélioré à partir du <i>mean shift</i>	Connexité, fonction de distance relative à l'angle dièdre, nombre de carreaux, taille du noyau du <i>mean shift</i>
[Yamauchi <i>et al.</i> , 2005a]	Aire gaussienne des vertex, des arêtes et des faces	Taille des régions, fonction de distance relative à l'aire gaussienne
[Choe <i>et al.</i> , 2006]	Plan, distance géodésique	Ratio de mise à jour, nombre d'itérations, planéité, distance $L2,1$
[Lai <i>et al.</i> , 2006]	Vertex défini dans $\mathbb{R}^6$ à partir de sa coordonnée et de sa normale, distorsion principale	Distance géométrique, courbure, texture, nombre de clusters
[Kraevoy <i>et al.</i> , 2006]	Coque convexe, aire	Seuillage de la convexité, fonction de distance définie à partir de la compacité de la coque convexe et de l'aire pondérée moyenne des distances des triangles du carreau à la coque convexe
[Yan <i>et al.</i> , 2006]	Quadrique	Distance euclidienne d'une face à une quadrique

TAB. 2.4 – Caractéristiques et critères des méthodes de partitionnement itératif.

### 2.3.5 Analyse spectrale

La problématique de segmentation de maillages est proche de celle du partitionnement de graphes planaires. De nombreux outils de partitionnement de graphe sont proposés dans le logiciel METIS [Karypis et Kumar, 1998] et leur application à des maillages polygonaux offrent des résultats intéressants.

Le graphe  $G$  du maillage peut être représenté par une matrice d'adjacence. Cette matrice binaire  $A(G)$  confronte tous les sommets du graphe et fournit  $A_{ij} = 1$  s'il existe une arête reliant les sommets  $i$  et  $j$ . Le Laplacien  $L$  du graphe est une matrice associée qui correspond à  $L = D - A$  où  $D$  est la matrice diagonale qui offre  $D_{ii} = d_i$ , la valence du  $i$ -ème vertex. La théorie spectrale de graphes [Chung, 1997] établit une relation entre les caractéristiques combinatoires et les propriétés algébriques de ce Laplacien [Gotsman, 2003]. Il y a par exemple une relation directe entre le spectre du Laplacien et le nombre isopérimétrique  $h_g$  (constante de Cheeger) du graphe qui permet de quantifier l'existence de coupes dans le graphe. Soit  $\{\lambda_0 = 0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}\}$ , les valeurs propres de  $L$  dans l'ordre croissant. La relation entre la valeur propre  $\lambda_1$  et le nombre isopérimétrique du graphe correspond à :

$$\frac{h_g}{2} < \lambda_1 \leq 2h_g \quad (2.20)$$

La seconde valeur propre du Laplacien  $L(G)$  contient des informations sur les petites « coupures » du graphe  $G$ . Les vecteurs propres de  $L(G)$  vont avoir un rôle important dans le partitionnement du graphe [Alpert et Yao, 1995]. Soit  $\{\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n-1}\}$ , les vecteurs propres de  $L$  associés aux valeurs propres  $\{\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}\}$ . Le graphe  $G$  peut être plongé dans un espace  $\mathbb{R}^d$  en utilisant les  $d$  premiers vecteurs propres. Un vertex  $v_i$  de  $G$  sera positionné à un point de coordonnées  $\{\xi_1(i), \xi_2(i), \dots, \xi_d(i)\} \in \mathbb{R}^d$ . Ce changement d'espace permet d'évoluer d'une problématique de partitionnement combinatoire de graphe à une problématique de partitionnement d'espace géométrique. La figure 2.15 montre la projection spectrale du graphe dans un espace à deux dimensions ( $d = 2$ ). La partition a été réalisée dans cet exemple en considérant la direction  $s$  du plus large écart entre les vertex dans  $\mathbb{R}^2$  et la droite normale à  $s$  qui partitionne  $\mathbb{R}^2$  en deux demi-espaces qui contiennent chacun une quantité équivalente de vertex.

La matrice du Laplacien a été utilisée dans [Karni et Gotsman, 2000] pour réaliser le partitionnement de graphe pour une application de compression de maillage. En raison d'une complexité importante, le maillage a été divisé en petits sous-maillages qui ont été traités indépendamment. Les sous-maillages considérés doivent être équilibrés par rapport au nombre de vertex et aux arêtes partagées par plusieurs sous-maillages.

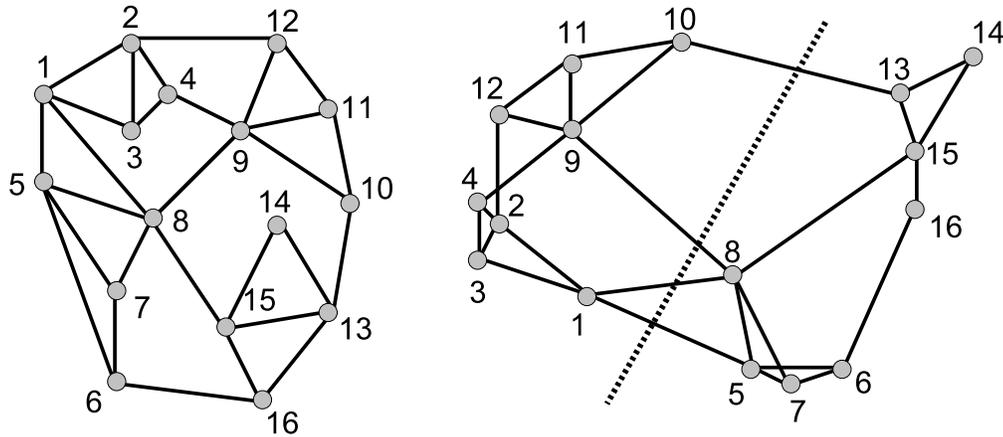


FIG. 2.15 – Un graphe et sa représentation spectrale en utilisant les deux premières valeurs propres de la matrice du Laplacien comme vecteur de coordonnées. Image inspirée de [Gotsman, 2003].

[Liu et Zhang, 2004] mettent en œuvre une segmentation de maillages polygonaux à partir du partitionnement de l'espace spectral. La matrice d'affinité et ses  $k$  plus grand vecteurs propres permettent le regroupement des faces du maillage. Le partitionnement est réalisé à l'aide de l'algorithme des  $k$ -means par rapport aux nouvelles coordonnées des vertex dans l'espace spectral.

[Zhou *et al.*, 2004] mettent en avant l'efficacité de l'analyse spectrale de la matrice des distances géodésiques entre deux points de la surface pour résoudre les problèmes de partitionnement en carreaux et de paramétrisation. Leur algorithme de partitionnement de surface détermine dans un premier temps des représentants de carreaux par rapport aux valeurs propres et aux vecteurs propres de la matrice des distances géodésiques au carré entre les vertex de la surface. Une croissance de régions simultanée est ensuite appliquée autour des carreaux en utilisant la distance géodésique calculée à partir de l'analyse spectrale de la surface.

Les méthodes de segmentation de [Zhang et Liu, 2005][Liu *et al.*, 2006a][Liu et Zhang, 2007] sont basées sur le découpage récursif spectral et la méthode de Nyström [Fowlkes *et al.*, 2004]. Cette dernière permet d'éviter de calculer toutes les paires de distances entre les faces en approximant les vecteurs propres d'une matrice par sous-échantillonnage des petits sous-ensemble de ses lignes. Les contraintes de segmentation sont ici relatives à la théorie des minima et à la mesure de la saillance des carreaux. La coupe est réalisée à partir de la projection spectrale 1-dimension, calculée à partir des distances entre un ensemble de faces et deux échantillons de faces. Le schéma d'échantillonnage est basé

sur le contexte de la forme et la recherche linéaire à partir de la projection 1-D pour localiser les frontières les plus fortes.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Karni et Gotsman, 2000]	Vecteurs propres de la matrice d'affinité	Partitionnement équitable à partir de nombre de vertex et du nombre d'arêtes partagées par plusieurs sous-maillages
[Liu et Zhang, 2004] [Liu <i>et al.</i> , 2006a]	Vecteurs propres de la matrice d'affinité	Partitionnement itératif à partir des coordonnées associées aux vecteurs propres
[Zhou <i>et al.</i> , 2004]	Vecteurs propres de la matrice des distances géodésiques au carré	Croissance de régions réalisée à partir de la distance géodésique définie par l'analyse spectrale de la surface
[Zhang et Liu, 2005] [Liu et Zhang, 2007]	Vecteurs propres de la matrice d'affinité, distance dans l'espace spectral	Loi des minima, mesure de la saillance

TAB. 2.5 – Caractéristiques et critères des méthodes de partitionnement à partir de l'analyse spectrale.

Le tableau 2.5 fait apparaître les différentes caractéristiques et les critères utilisés pour les méthodes de partitionnement à partir de l'analyse spectrale. La projection des vertex dans un espace spectral en fonction la distance géodésique est généralement utilisée. Les méthodes de croissance de régions ou bien de partitionnement itératif sont employées pour réaliser la segmentation. Les applications sont souvent liées à la segmentation en parties significatives, à la compression, etc.

### 2.3.6 Les modèles déformables

Certaines applications nécessitent une approche par modèles déformables. Ils permettent de faire évoluer un contour et de le positionner aux endroits minimisant une énergie. Un tel contour est qualifié de « contour actif ». Ce type de contour est utilisé dans [Jung et Kim, 2004] pour trouver des caractéristiques liées à la courbure gaussienne ou à des surfaces de type « crêtes » et « vallées ». La méthode explicite de [Milroy *et al.*, 1997] est utilisée pour déplacer le contour actif directement sur le maillage polygonal. Les changements de topologie du contour sont autorisés et permettent d'obtenir plusieurs contours fermés à partir d'un seul contour grossièrement initialisé.

[Lee *et al.*, 2004] proposent un découpage intelligent de l'objet en utilisant les contours actifs 3D. La méthode utilise la loi des minima et l'extraction de caractéristiques pour trouver les contours candidats. Les contours peuvent être définis automatiquement ou bien manuellement (l'utilisateur peut dessiner une ligne sur la projection de l'objet qui sera interprétée comme un contour ouvert sur la surface). Le procédé choisit le meilleur contour pour séparer l'objet en deux. La fermeture du contour ouvert déterminé manuellement ou automatiquement est alors réalisée. Un contour actif 3D évolue ensuite pour ajuster le contour en fonction des caractéristiques de courbure et de centricité. Les sous-parties du maillage peuvent subir des divisions.

[Lee *et al.*, 2005b] ont abordé le découpage d'un maillage polygonal à partir de la loi des minima et de la saillance des parties. Cette méthode est basée sur la loi des minima et consiste en l'extraction de caractéristiques pour déterminer les contours candidats. Ces contours ouverts sont triés de sorte à faire apparaître le plus saillant. Celui-ci est alors complété pour former une boucle qui servira à l'initialisation d'un contour actif. Si le contour fermé offre des conditions suffisantes de saillance, il est autorisé à se déplacer jusqu'à la position de coupe la plus appropriée. Les objets découpés peuvent à leur tour subir successivement une décomposition.

Une solution de segmentation du relief d'un maillage à l'aide de contours actifs est proposée dans [Liu *et al.*, 2006b]. La méthode utilise un terme d'énergie de caractéristique adapté à la segmentation de relief de maillage, une force de dégonflement dont l'intensité est calculée pour rendre le contour insensible au choix du contour initial, une phase d'ajustement du contour actif pour permettre l'exploration de cavités, un terme d'atténuation de bruit dans l'énergie de dégonflement et enfin un filtrage bilatéral des caractéristiques pour permettre au contour de traverser des zones bruitées.

[Ji *et al.*, 2006] ont proposé un outil de découpage de maillage très intuitif et facile à utiliser. Leur travaux sont inspirés de la méthode de segmentation interactive sur les images de [Li *et al.*, 2004]. L'utilisateur a la possibilité de spécifier les représentants de la zone « avant-plan » et « arrière-plan » du maillage sous la forme de courbes dessinées à main levée. Les courbes « avant-plan » et « arrière-plan » correspondent aux deux marqueurs du processus de segmentation. Ces courbes sont alors projetées sur le maillage pour labéliser les vertex interceptés. Une croissance de régions basée sur [Wu et Levine, 1997][Page *et al.*, 2003b] est ensuite réalisée à partir des vertex marqués. La métrique isophotique [Pottmann *et al.*, 2004] est utilisée pour mesurer la distance entre deux vertex adjacents. Les frontières sont optimisées à partir d'une version améliorée de la méthode de [Bischoff et Kobbelt, 2004].

Le tableau 2.6 fait apparaître les différentes caractéristiques et les critères utilisés pour

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Jung et Kim, 2004]	Courbure gaussienne, type de surface	Énergie calculée à partir de distances relatives aux caractéristiques
[Lee <i>et al.</i> , 2004] [Lee <i>et al.</i> , 2005b]	Courbure minimum	Centricité du contour, saillance
[Liu <i>et al.</i> , 2006b]	Courbure, angle	Taille et courbure du contour, énergies de dégonflement et de caractéristique
[Ji <i>et al.</i> , 2006]	Distance isophotique, courbure	Frontières déterminées à partir de la croissance de régions et des contours actifs

TAB. 2.6 – Caractéristiques et critères des méthodes basées sur les modèles déformables.

les méthodes basées sur les modèles déformables. Les énergies du contour sont variées et font généralement intervenir la caractéristique de courbure. Les contours actifs 3D sont souvent utilisés pour réaliser une segmentation interactive de maillage. Par exemple, l'utilisateur définit grossièrement la position initial des contours actifs et ces derniers évoluent jusqu'aux frontières des régions. Il existe d'autres stratégies pour réaliser une segmentation interactive comme la LPE initialisée à partir de marqueurs définis manuellement ou certaines méthodes abordées à la section suivante.

### 2.3.7 Autres approches

La segmentation de maillages fait généralement intervenir des méthodes issues des familles précédentes. Nous présentons dans cette section des méthodes dont le concept est particulier (image de géométrie), spécifique (*mean shift*), ou encore axé sur la segmentation manuelle ou semi-manuelle.

[Boier-Martin, 2003] transforme le maillage polygonal en une image géométrique 2D [Gu *et al.*, 2002]. La segmentation est réalisée sur la carte des normales associée à l'image géométrique à l'aide de l'algorithme des *k-means*. Les centroïdes sont initialisés à partir d'un échantillonnage des normales suivant certaines directions.

Les méthodes de partitionnement non supervisé, comme le *mean shift* [Comaniciu et Meer, 2002], peuvent être appliquées à la segmentation de maillages. L'analyse par *mean shift* a été étendue aux maillages polygonaux en utilisant des paramétrisations locales dans [Shamir *et al.*, 2004] [Shamir *et al.*, 2006]. La méthode de [Yamauchi *et al.*, 2005b]

est basée sur les travaux de [Sander *et al.*, 2003] pour réaliser le partitionnement par *mean shift* des normales de la surfaces.

Certaines méthodes sont axées sur une segmentation manuelle ou semi-manuelle. [Gregory *et al.*, 1999] mettent en correspondance des carreaux de plusieurs modèles pour une application de métamorphose. Contrairement à [Zöckler *et al.*, 2000] où les carreaux sont définis à la main, la création des carreaux est ici réalisée à partir des spécifications de correspondance et de la décomposition semi-manuelle du maillage. L'utilisateur désigne manuellement des ensembles de vertex. L'algorithme réalise ensuite la décomposition à partir du réseau de vertex sur chacun des objets sous la contrainte que les carreaux doivent être homéomorphes à un disque fermé.

[Funkhouser *et al.*, 2004] proposent une application qui permet à l'utilisateur de rechercher un maillage dans une grande base de données pour trouver des parties de modèles spécifiques et les combiner pour former de nouveaux objets. Un découpage intelligent du maillage est réalisé pour permettre la sélection d'une partie de l'objet. Une requête à partir de la sélection pourra alors être exécutée pour retrouver une partie similaire dans la base de données. La sélection pourra également subir des opérations géométriques. Le découpage est guidé par l'utilisateur qui dessine les contours sur la projection du maillage. Le contour est alors interprété sur la surface du maillage et complété à partir d'un algorithme du plus court chemin. Certaines portions peuvent être affinées par l'utilisateur : celui-ci redessine une portion puis l'algorithme du plus court chemin est utilisé pour ajuster au mieux la portion de contour à remplacer.

L'approche de segmentation de [Liyan *et al.*, 2004] est orientée pour la paramétrisation et le rééchantillonnage du maillage. Elle se décompose en 3 étapes : la création d'un nouveau maillage pour représenter la topologie de la segmentation initiale, la création d'un réseau de carreaux triangulaires par rapport au maillage original puis la modification interactive de la segmentation initiale pour créer le maillage segmenté final. Le maillage est dans un premier temps simplifié à partir de [Garland et Heckbert, 1997] puis les arêtes du maillage simplifié sont projetées sur le maillage original. L'utilisateur peut alors modifier les carreaux par l'intermédiaire d'un outil permettant la fusion ou la subdivision de carreaux, la modification de coin et la modification des frontières.

Pour réaliser une copie de haute qualité d'un objet réel de type C.A.O., [Várady *et al.*, 2007] ont proposé une méthode de segmentation qui combine la théorie de Morse avec des algorithmes particuliers de modélisation géométrique adaptés à la rétro-ingénierie. La théorie de Morse aborde des problématiques telles que l'échantillonnage d'une fonction lisse sur les sommets de la structure discrète. Le complexe de Morse permet la segmentation d'une variété en plusieurs régions par un réseau de courbes qui se connectent

à des points critiques non dégénérés (minima, maxima ou points selles) d'une fonction donnée. La courbure estimée en chaque vertex est utilisée pour créer une fonction linéaire par morceaux et ainsi distinguer les carreaux surfaciques fortement courbés qui séparent les carreaux principaux.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Boier-Martin, 2003]	Normale, courbure	Partitionnement itératif de l'image issue de la paramétrisation
[Funkhouser <i>et al.</i> , 2004]	Normale, angle dièdre, contour spécifié par l'utilisateur	Création d'un contour fermé à partir d'une fonction de coût relative aux caractéristiques
[Liyen <i>et al.</i> , 2004]	Plan	Planéité, suppression manuelle de frontières
[Várady <i>et al.</i> , 2007]	Points critiques, courbure, squelette	Connexion de points critiques, planéité, similarité

TAB. 2.7 – Caractéristiques et critères des autres méthodes.

Les caractéristiques et critères utilisés pour ces différentes méthodes sont résumés au tableau 2.7. Il existe d'autres approches, moins appliquées, qui font intervenir des procédés de segmentation particuliers, comme le partitionnement de maillage avec une colonie de fourmis [Korošec *et al.*, 2004] et la coupe de graphe en simples disques topologiques [Erickson et Har-Peled, 2002][Colin de Verdière et Lazarus, 2002].

La segmentation en carreaux surfaciques permet de découper un maillage polygonal à partir d'informations géométriques. Certaines applications nécessitent la découpe de l'objet en parties significatives. Les « parties » sont segmentées à partir d'informations sémantiques ou globales de la forme de l'objet 3D. La section suivante concerne la segmentation en parties significatives. Les différentes applications et méthodes de ce type de segmentation sont détaillées.

## 2.4 La segmentation en parties significatives

La segmentation en parties significatives concerne des applications où la sémantique des objets a une importance. La segmentation essaie généralement de suivre le découpage qui pourrait être réalisé par la vision humaine. De nombreux travaux relatifs à la vision humaine indiquent que la reconnaissance et la compréhension des formes sont

basées sur la décomposition structurelle de la forme en petites parties. Il existe deux principales familles de segmentation en parties significatives : les méthodes orientées « primitives » et les méthodes orientées « frontières ». Des états de l'art des différentes méthodes de segmentation en parties significatives ont été proposés récemment dans [Shamir, 2006][Agathos *et al.*, 2007]. Une étude comparative de certaines de ces méthodes a été proposée dans [Attene *et al.*, 2006b] où les auteurs soulignent la difficulté d'évaluation des différentes approches. Dans ce qui suit, nous listons les applications qui utilisent le concept de segmentation en parties significatives et nous détaillons les différentes méthodes.

La **reconnaissance de forme et l'indexation** ont été abordées à la section 2.3, concernant la segmentation en carreaux surfaciques. Une approche classique consiste en l'association pour chaque objet d'une signature représentant un ensemble de caractéristiques. Le graphe des carreaux surfaciques convexes est utilisé pour créer des signatures dans les travaux de [Zuckerberger *et al.*, 2002][Tal et Zuckerberger, 2006]. On pourra trouver une bonne description de la problématique de l'indexation 3D dans les études [Tangelder et Veltkamp, 2004][Tung, 2005] et le projet SEMANTIC-3D [Baskurt *et al.*, 2004]. Il existe de nombreux descripteurs de formes [Zaharia et Prêteux, 2004]; nous ne traiterons cependant que des approches structurales [Spagnuolo *et al.*, 2006] qui font intervenir la segmentation de maillages polygonaux.

L'**animation et la déformation** de modèles 3D nécessitent généralement de disposer d'un modèle segmenté ainsi que d'un squelette associé aux différentes parties de l'objet [Lien *et al.*, 2006][Aujay *et al.*, 2006]. L'animation fait généralement intervenir une représentation hiérarchique des articulations principales appelées squelette animation. Les articulations du squelette peuvent être déplacées de manière individuelle, ce qui impliquera une déformation du squelette par cinématique directe ou inverse. L'enveloppe externe est simultanément déformée autour du squelette.

La **conception d'objets réels** à partir de modèles 3D peut faire intervenir la segmentation de maillages polygonaux comme nous avons pu le voir à la section 2.3 avec la conception d'objets en papier (*papercraft*). La méthode de [Raab *et al.*, 2004] utilise la segmentation en parties significatives pour réaliser des objets en bois. Le squelette est dans un premier temps calculé puis il est associé à des primitives simples (cylindre, demi-sphère, etc.). Chaque primitive peut subir plusieurs décompositions de sorte à ressembler plus précisément au modèle 3D d'origine.

La vision humaine fait intervenir une multitude de récepteurs sensoriels ainsi qu'un très grand nombre de neurones dans le cerveau. Distinguer un objet par rapport à un arrière plan, reconnaître un objet parmi d'autres sont des tâches faciles pour un être

humain, mais correspondent à des problèmes très compliqués en vision par ordinateur. [Hoffman et Richards, 1987] ont émis l'hypothèse que notre système de vision décompose une forme en plusieurs parties, ce qui souligne alors l'existence de lois pour définir les frontières de ces parties. Leurs travaux ont aboutis à la loi des minima qui correspond à la décomposition de la surface en parties le long des contours à tendances concaves.

### 2.4.1 La loi des minima

L'étude de [Hoffman et Richards, 1987] traite du concept de la décomposition d'un objet par la vision humaine. L'exemple de la figure 2.16 propose deux interprétations différentes selon le sens d'observation. Les auteurs montrent l'importance de considérer les discontinuités concaves et convexes. Un autre exemple est illustré à la figure 2.17 où plusieurs segmentations différentes peuvent avoir une interprétation correcte.

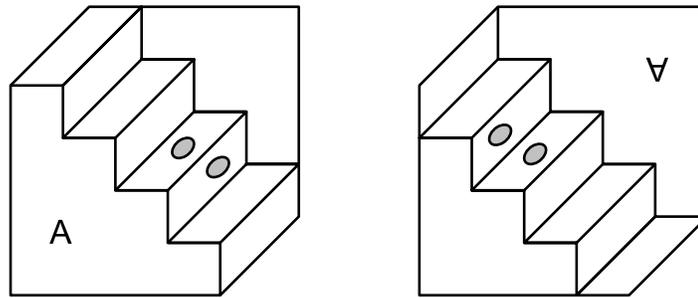


FIG. 2.16 – L'escalier de Schroder, proposé par H. Schroder en 1858, montre que la signification d'une frontière change lorsque la figure est retournée. Les deux points qui appartiennent à une même marche sur cette figure sont associés à des marches adjacentes lorsque la figure est retournée.

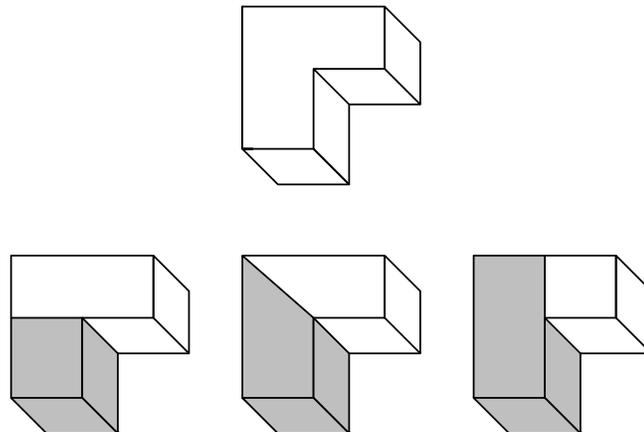


FIG. 2.17 – Forme en coude montrant plusieurs segmentations possibles.

Trois principaux outils pour la segmentation de surface sont abordés : la normale de surface, la courbure principale et les lignes de courbure. Le sens de la normale est important et, dans le cas d'une surface fermée, est caractérisé comme normale interne ou normale externe. Le mathématicien suisse Leonhard Euler a découvert qu'en n'importe quel point de la surface, il existe toujours une direction pour laquelle la courbure de la surface est la plus faible et une deuxième direction, orthogonale à la première, pour laquelle la courbure est la plus forte (la sphère et le plan sont des cas particuliers car ils n'ont pas de variation de courbure). Ces deux directions en un point sont appelées directions principales en ce point et les courbures de surfaces correspondantes sont appelées courbures principales (Figure 2.18).

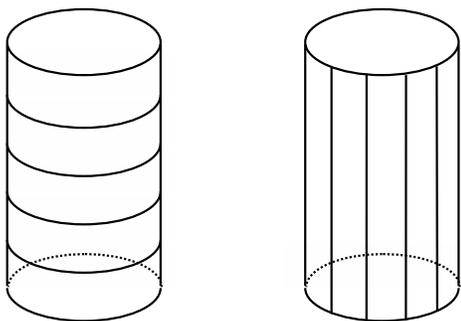


FIG. 2.18 – Lignes des plus fortes courbures à gauche, lignes des plus faibles à droite.

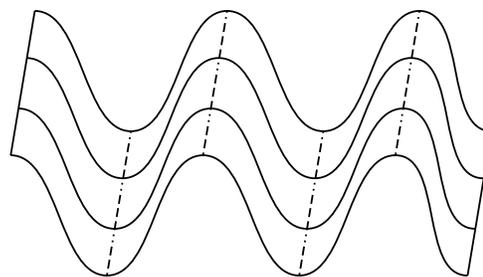


FIG. 2.19 – Cas où la courbure gaussienne sera nulle sur toute la surface.

Une discontinuité de type concave peut devenir un contour où, localement, la surface a la plus grande courbure négative. Hoffman et Richards ont proposé la loi des minima, qui consiste à diviser une surface en parties en tenant compte des minima négatifs de chaque courbure principale le long de ses lignes de courbures associées. Ils traitent ensuite de la courbure gaussienne, qui est le produit des deux principales courbures, et donne l'exemple de la figure 2.19 où la courbure gaussienne sera inefficace pour caractériser les différentes parties d'une surface. Les formes peuvent avoir deux types de régions : des « régions positives » qui sont entourées par des extrema négatifs de la courbure principale et des « régions négatives » (les trous) qui sont entourées par des extrema positifs de la courbure principale.

Il existe plusieurs manières de segmenter un objet. On parlera de polyvalence pour définir la compatibilité d'un schéma de segmentation par rapport à plusieurs types d'objets. Cette contrainte de polyvalence peut nous aider à choisir entre deux principales classes de schéma de segmentation : la segmentation basée sur les frontières et la segmentation basée sur les primitives. La première approche définit des régions à partir des contours plus ou moins marqués de la surface de l'objet, la deuxième définit des régions par rapport à la forme de l'objet. L'approche basée sur les frontières offre une bonne po-

lyvalence car elle est compatible avec tout type d'objet et décompose généralement la surface en de petits éléments de surface. La deuxième approche n'offre pas une grande polyvalence car elle se prête bien au partitionnement de modèles de type « humanoïde » ou « animal » par exemple mais est inappropriée pour segmenter un objet dont les caractéristiques principales sont localisées sur la surface, une voiture ou un visage en étant une bonne illustration. L'avantage de la segmentation basée frontière est qu'elle ne nécessite pas d'information *a priori* sur le type de la forme. Il est à souligner qu'il n'existe pas une segmentation unique d'un modèle mais plusieurs, chacune pouvant intervenir à un niveau de détail différent. On pourra par exemple simplement souhaiter dissocier le visage des cheveux sur une tête ou aller plus loin en repérant les détails du visage ; les échelles, ici, ne sont pas les mêmes. Hoffman et Richards proposent que la segmentation devrait être possible uniquement avec les informations perçues par la rétine.

[Singh *et al.*, 1999] ont proposé une nouvelle loi qui autorise un contraste entre les différentes parties en faisant intervenir l'information de la forme globale. La loi de la « coupe courte » (*short-cut rule*) spécifie que le système de vision humain préfère connecter les points de segmentation qui sont proches pour former une partie comme le montrent les figures 2.20 et 2.21.

En deux dimensions, la ligne qui sépare deux régions doit respecter les conditions suivantes :

- être droite,
- traverser un axe de symétrie locale,
- connecter deux points du contour de telle sorte qu'au moins un point ait une courbure minimale négative (figure 2.21).

La longueur d'une coupe influence la « saillance » d'une partie. La saillance d'une partie peut s'interpréter comme le degré avec lequel la partie se sépare de l'objet. Plus une partie est saillante, plus elle sera facile à reconnaître. [Hoffman et Singh, 1997] ont ajouté trois informations importantes pour caractériser la saillance des parties : l'aire de la partie par rapport à la surface de l'objet, la force d'une frontière et le degré de « protrusion » de la partie (voir section 2.4.3). [De Winter et Wagemans, 2006] ont proposé des explications plus détaillées sur le sujet à partir d'une étude à grande échelle sur la manière dont la vision humaine réalise la segmentation d'objets en parties significatives. [Page, 2003] a réalisée une étude précise de la décomposition en parties des surfaces 3D à partir de concepts relatifs à la vision humaine. De nombreuses méthodes de segmentation en parties significatives tiennent compte de la loi des minima. Une des approches les plus populaires est la décomposition en carreaux convexes.

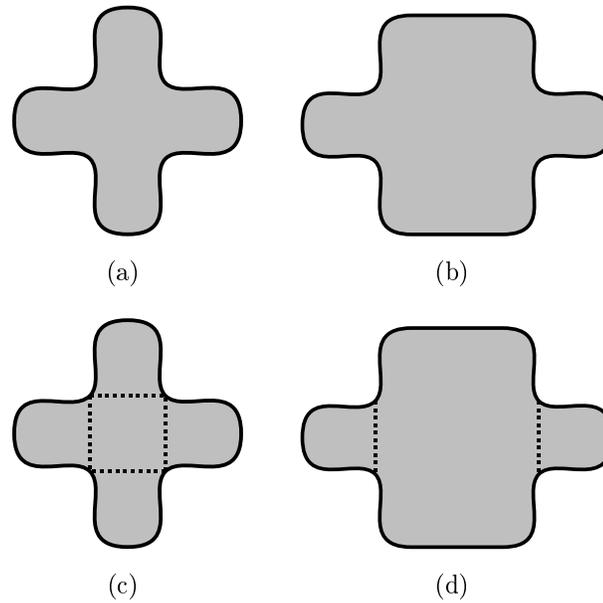


FIG. 2.20 – Limitation de la loi des minima. Les deux croix en (a) et en (b) ont le même nombre de minima négatifs et approximativement la même position. Leur partitionnement le plus naturel est cependant différent comme le montre (c) et (d).

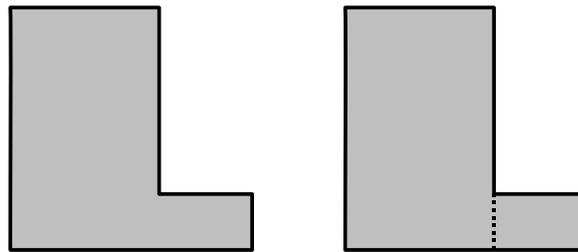


FIG. 2.21 – Une autre limitation de la loi des minima. Certains points de frontière n'ont pas de courbure négative.

## 2.4.2 Décomposition en parties convexes

La décomposition convexe d'un maillage polygonal correspond à la décomposition d'un objet non convexe en petits objets convexes (figure 2.22). Certaines méthodes réalisent une décomposition approximative convexe en coupant le modèle 3D aux endroits les plus concaves. Dans [Wu et Levine, 1997], les propriétés physiques des charges électriques de la surface d'un conducteur sont utilisées pour identifier les zones convexes et concaves. Ces charges ont tendances à s'accumuler aux angles de forte convexité et à disparaître aux endroits concaves. [Falcidieno et Spagnuolo, 1992] ont proposé de segmenter un maillage en régions ayant des types similaires de courbure (concave, convexe, planaire, carreaux en forme de selle). Dans [Chazelle *et al.*, 1997], la décomposition en carreaux

convexes est abordée comme un problème d'optimisation NP-complet. Plusieurs classes d'heuristiques basées sur la décomposition convexe à partir de méthodes gloutonnes linéaires sont proposées. Un algorithme de croissance de régions est utilisé sur le graphe dual du maillage. Le procédé de croissance démarre à partir d'un nœud germe du graphe dual et collecte les nœuds voisins tant que le carreau est convexe. Lorsque le carreau est stabilisé, le procédé de croissance recommence avec un nouveau germe.

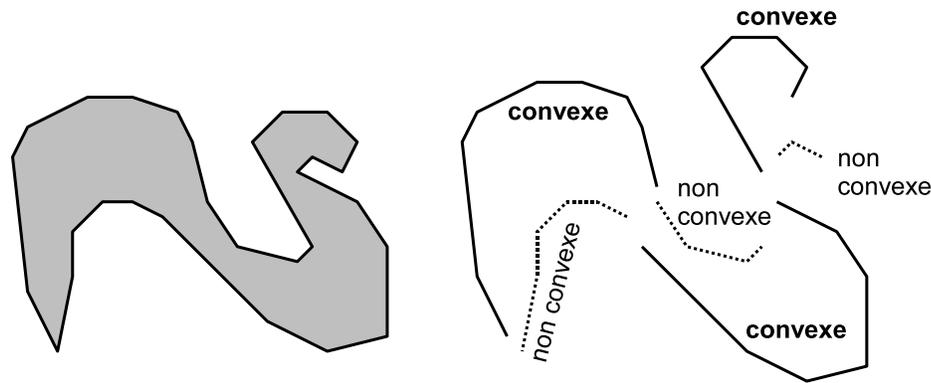


FIG. 2.22 – Décomposition d'un modèle en carreaux surfaciques convexes et non convexes.

Dans [Zuckerberger *et al.*, 2002], l'algorithme de la LPE est utilisé sur un graphe d'arêtes pour réaliser la décomposition en carreaux convexes. La fonction de hauteur est définie par :  $h(\text{arête}) = 1 - \cos(\theta)$  où  $\theta$  correspond à l'angle dièdre d'une arête partagée par deux triangles. La sur-segmentation est corrigée en fusionnant les régions dans l'ordre croissant de leur aire sous la limite d'un seuil. Dans le cadre d'une application de reconnaissance des formes, les petites régions peuvent être ignorées d'après l'observation de [Biederman, 1995] : la reconnaissance peut être rapide et précise même si seulement deux ou trois structures volumiques élémentaires 3D (*geons* ou *geometric ions*) d'un objet complexe sont visibles. Cette méthode, qui fait intervenir la LPE avec une fonction de hauteur conduisant à la formation de carreaux convexes, est déjà citée à la section 2.3.2. Parmi les techniques utilisant la décomposition en carreaux convexes ou coupes au niveau des zones concaves précédemment citées, on peut distinguer les méthodes basées sur la croissance de régions et la LPE [Zhang *et al.*, 2002] [Page *et al.*, 2003b] [Page *et al.*, 2003a], le partitionnement itératif [Katz et Tal, 2003], l'analyse spectrale [Liu et Zhang, 2004] [Zhang et Liu, 2005] [Liu *et al.*, 2006a] [Liu et Zhang, 2007] ainsi qu'une technique de positionnement de contours actifs aux endroits concaves du maillage [Lee *et al.*, 2004][Lee *et al.*, 2005b].

Une méthode de décomposition convexe approximative est proposée dans [Lien et Amato, 2004][Lien et Amato, 2006]. Les méthodes exactes sont très coûteuses en temps de calcul et le résultat correspond généralement à une sur-segmentation. La méthode

correspond ici à l'estimation de la convexité d'un composant à partir de l'information de concavité. Une forme pourra être estimée convexe si la mesure de concavité est inférieure à un seuil. Les auteurs abordent la problématique de la mesure des caractéristiques de concavité sur les polyèdres et apportent des solutions en définissant certaines positions de coupe puis en regroupant les caractéristiques.

[Lien *et al.*, 2006] réalisent simultanément la décomposition hiérarchique d'une forme 3D et la création de son squelette. Le schéma de décomposition suit le même principe que dans [Lien et Amato, 2006]. La « qualité » du squelette est utilisée pour guider la recherche itérative de la meilleure décomposition. [Kraevoy *et al.*, 2006] ont développé une métrique de convexité (abordée à la section 2.3.4) qui permet la segmentation d'un maillage polygonal en parties significatives à partir d'un unique paramètre de seuil.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Wu et Levine, 1997]	Distribution de la densité des charges électriques	Contours définis par les minima de la distribution de la densité des charges électriques
[Falcidieno et Spagnuolo, 1992]	Type de surface	Concavité, convexité, planéité, carreau en forme de selle
[Chazelle <i>et al.</i> , 1997]	Courbure	Convexité, taille de la région
[Zuckerberger <i>et al.</i> , 2002]	Angle dièdre	Fonction de hauteur
[Zhang <i>et al.</i> , 2002]	Courbure gaussienne	Seuil au niveau de la courbure
[Katz et Tal, 2003]	Distance géodésique, angle dièdre	Fonction de distance définie à partir de la distance géodésique, de l'angle dièdre et de la probabilité d'appartenance à un carreau,
[Liu et Zhang, 2004] [Liu <i>et al.</i> , 2006a]	Vecteurs propres de la matrice d'affinité	Partitionnement itératif à partir des coordonnées associées aux vecteurs propres
[Zhou <i>et al.</i> , 2004]	Vecteurs propres de la matrice des carrés des distances géodésiques	Croissance de régions réalisée à partir de la distance géodésique définie par l'analyse spectrale de la surface

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Zhang et Liu, 2005] [Liu et Zhang, 2007]	Vecteurs propres de la matrice d'affinité, distance dans l'espace spectral	Loi des minima, mesure de la saillance
[Lee <i>et al.</i> , 2004] [Lee <i>et al.</i> , 2005b]	Courbure minimum	Centricité du contour, saillance
[Lien et Amato, 2004] [Lien et Amato, 2006]	Position des vertex, coque convexe	Distance des vertex à la coque convexe
[Lien et Amato, 2004]	Position des vertex, coque convexe, squelette	Distance des vertex à la coque convexe, centricité
[Kraevoy <i>et al.</i> , 2006]	Coque convexe, aire	Seuillage de la convexité, fonction de distance définie à partir de la compacité de la coque convexe et de l'aire des distances des triangles du carreau à la coque convexe

TAB. 2.8 – Caractéristiques et critères des méthodes de décomposition en parties convexes.

Les caractéristiques et critères utilisés pour la décomposition en parties convexe sont résumés dans le tableau 2.8. Les carreaux convexes sont obtenus par la localisation de frontières concaves ou par la décomposition successive de la coque convexe. Les caractéristiques correspondent généralement à la courbure, l'angle dièdre, des vecteurs propres de la matrice d'affinité, la position des vertex et la coque convexe. La loi de minima, la saillance ou encore la distance à la coque convexe font partie des critères les plus pertinents.

### 2.4.3 Points critiques et protrusions

Les points critiques sont des caractéristiques de saillance du maillage polygonal qui peuvent être utilisées pour distinguer les différentes protrusions du maillage. [Zhou et Huang, 2004] ont mis en place une méthode de détection de points critiques pour réaliser la décomposition du maillage. Le maillage est d'abord rééchantillonné pour permettre une décomposition plus précise. Le rééchantillonnage peut correspondre à la création de nouveaux vertex au milieu de certaines arêtes et à leur connexion afin de créer de nouvelles faces. Un seuil sur la taille maximum des arêtes peut être utilisé pour stopper le processus de rééchantillonnage. Le procédé de détection des points critiques

est initialisé à partir d'un vertex racine. La carte des distances et le graphe orienté appelé « arbre géodésique » sont ensuite construits. La labellisation des vertex est alors opérée pour déterminer :

- les extrema locaux : le vertex  $v$  est un extremum local si tous les voisins de  $v$  sont plus proches du vertex racine,
- les vertex réguliers : les vertex réguliers possèdent des voisins dont la distance est plus proche et d'autres dont la distance est plus éloignée de la racine. La séquence des voisins correspond cependant à une seule alternance de voisins plus proches et de voisins plus éloignés comme le montre la figure 2.23,
- les vertex selles : si la séquence des voisins correspond à plus d'une alternance de voisins plus proches et plus éloignés, alors le vertex est un point selle.

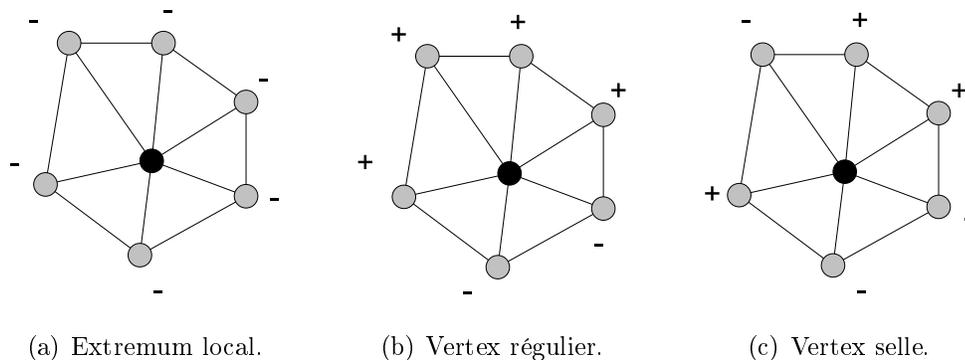


FIG. 2.23 – Classification des vertex par rapport à la distance géodésique. Les voisins positifs et négatifs sont respectivement plus éloignés et plus proches du vertex racine.

La segmentation est alors réalisée en utilisant une croissance de régions à partir de l'extremum local le plus éloigné. Cet extremum local donnera son label à tous les vertex parcourus par la croissance de régions qui sera stoppée dès lors qu'un vertex selle ou un vertex déjà labellisé sera rencontré. Ce procédé de labellisation se renouvellera avec chacun des extrema locaux.

[Li *et al.*, 2001] définissent un point critique comme un point de frontière entre deux composants qui correspond à un changement de géométrie et / ou de topologie. La méthode fait intervenir une fonction géométrique et une fonction topologique. La séparation de deux parties peut être calculée par le passage par zéro d'une dérivée de la fonction géométrique. Les deux fonctions sont nécessaires à la définition d'un point critique qui ne peut appartenir à un composant. Les points critiques interviennent dans la construction du squelette du modèle 3D. Les différentes branches du squelette pourront alors être utilisées pour la labellisation des faces du maillage.

[Hilaga *et al.*, 2001] ont abordé le calcul des protrusions à partir de l'intégrale de la distance géodésique. Comme dans [Li *et al.*, 2001], le maillage peut être rééchantillonné

pour améliorer la mesure de distance. La fonction de protrusion d'un vertex  $v$  du maillage  $S$  correspond à la somme des distances géodésiques de ce vertex à tous les autres :

$$\mu(v) = \int_{p \in S} g(v, p) dS \quad (2.21)$$

Cette fonction permet de caractériser la centricité d'un vertex. Une faible valeur correspondra à une distance relativement petite de  $v$  à tous les autres vertex et indiquera que ce vertex est plutôt situé au centre de l'objet. Une version normalisée de cette équation correspond à :

$$\mu_n(v) = \frac{\mu(v) - \min_{p \in S} \mu(p)}{\max_{p \in S} \mu(p)} \quad (2.22)$$

Cette fonction permet une relative invariance à la pose du modèle 3D. L'équation 2.21 peut être approximée de manière discrète à partir de :

$$\mu(v) = \sum_i g(v, b_i) \cdot aire(b_i) \quad (2.23)$$

où les  $\{b_i\} = \{b_0, b_1, \dots\}$  correspondent aux vertex de la surface.  $aire(b_i)$  correspond à l'aire de la portion de maillage occupée par  $b_i$ ; son calcul est détaillé dans [Hilaga *et al.*, 2001].

De nombreuses méthodes utilisent la fonction de centricité. [Valette *et al.*, 2005] ont mis en place un algorithme de « conquête de protrusions » pour identifier les parties d'un modèle 3D. Le procédé de conquête consiste en l'analyse des composants  $C$  de la fonction suivante lorsque  $x$  diminue :

$$C = \{p \in S \mid \mu(p) \geq x\} \quad (2.24)$$

où  $p$  est un vertex du maillage  $S$  et  $\mu(p)$ , l'intégrale des distances géodésiques de ce vertex. Ce procédé permet ainsi de faire successivement apparaître les protrusions ainsi que leur composants associés et de les connecter. Les régions trop petites sont ajoutées aux principales parties. Le réajustement des régions est ensuite réalisé pour limiter les parties aux principales intersections.

[Dey *et al.*, 2003] segmentent un modèle, dans  $\mathbb{R}^2$  ou  $\mathbb{R}^3$ , en variétés stables qui correspondent à un ensemble de complexes de Delaunay de points échantillonnés le long des frontières. Les nœuds maxima de Voronoï permettent la création de ces variétés stables qui, après une étape de fusion, correspondent aux différentes parties du modèle.

[Katz *et al.*, 2005] ont proposé une méthode de segmentation basée sur les points caractéristiques et l'extraction de noyau. Pour déterminer les parties significatives, ils

mettent en œuvre plusieurs traitements comme la simplification du maillage pour accélérer les calculs et réduire le bruit ou comme une invariance à la pose en transformant le maillage en une nouvelle représentation où les distances euclidiennes entre les points sont les mêmes que les distances géodésiques. La détection des points caractéristiques est réalisée à partir de la proéminence des points sur la nouvelle représentation. Une transformation « miroir sphérique » est utilisée pour générer une forme « miroir ». Les différentes parties du modèle pourront être identifiées en considérant la coque convexe de cette forme.

[Yamazaki *et al.*, 2006] déterminent les points critiques de type maximum et les connectent pour définir un graphe. Un algorithme de coupe de graphe est utilisé pour séparer le maillage en deux. La bisection est réalisée à partir de l'analyse spectrale du graphe dont le poids des arcs correspond à l'indice de similarité entre les points critiques extrémités. L'ajustement de la segmentation est ensuite réalisé pour que toutes les régions contiennent au moins une caractéristique significative.

[Lin *et al.*, 2007] utilisent la caractérisation par saillance de parties à partir des critères de [Hoffman et Singh, 1997], à savoir la protrusion d'une partie, la taille de la partie par rapport à la surface de l'objet et la force d'une frontière. Le critère utilisé pour sélectionner les caractéristiques de saillance correspond aux maxima locaux des protrusions. A partir de ces informations, la position potentielle des frontières est calculée. La résolution du problème de flot maximum (coupe minimum) sur la zone potentielle de frontière est utilisée pour définir une frontière franche.

Le tableau 2.9 fait apparaître un résumé des caractéristiques et critères des méthodes basées sur les points critiques et les protrusions. Les points critiques sont de bons indicateurs pour repérer les parties, notamment les maxima qui en définissent les extrémités et les points selle qui caractérisent l'intersection de plusieurs parties.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Li <i>et al.</i> , 2001]	Squelette défini à partir des points critiques	Coupes définies à partir des plans perpendiculaires aux directions des branches du squelette
[Dey <i>et al.</i> , 2003]	Variété stable fermée	Maxima des vertex de Voronoï, fusion des régions superficielles
[Zhou et Huang, 2004]	Points critiques	Croissance de régions stoppée par la rencontre avec un vertex selle

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Valette <i>et al.</i> , 2005]	Intégrale des distances géodésiques	Taille et centre des régions, nombre de composants en fonction de l'intégrale des distances géodésiques
[Katz <i>et al.</i> , 2005]	Point critique, angle dièdre	Centricité, coque convexe de la forme miroir
[Yamazaki <i>et al.</i> , 2006]	Points critiques de type maximum	Succession de coupes de graphe
[Lin <i>et al.</i> , 2007]	Saillance	Maxima locaux des protrusions, taille de la partie par rapport à la surface de l'objet, force d'une frontière

TAB. 2.9 – Caractéristiques et critères des méthodes basées sur les points critiques et protrusion.

#### 2.4.4 Descripteurs de forme multi-échelles

Les descripteurs multi-échelles peuvent être utilisés pour décrire un maillage et extraire ses composants. [Mortara *et al.*, 2004a] réalisent la segmentation d'un maillage à partir des descripteurs de formes à plusieurs échelles. En chaque point, un ensemble de sphère de rayon  $R_i$  est utilisé et l'intersection de la sphère avec le maillage est mesurée. Le nombre d'intersections caractérise la forme du voisinage 3D autour du point à différentes échelles. Selon le nombre d'intersections, ils peuvent attribuer aux vertex une caractéristique équivalente à un pic, un trou, une montagne, une intersection, une jointure, etc. Une fois que les caractéristiques de tous les vertex ont été identifiées, une croissance de régions permet de regrouper les vertex par label par rapport à une échelle particulière.

La méthode « Plumber » [Mortara *et al.*, 2004b][Mortara *et al.*, 2006] correspond à une spécialisation de l'approche [Mortara *et al.*, 2004a]. « Plumber » s'applique en particulier aux modèles de type humanoïde, animal ou tubulaire. Les centres des sphères ne sont plus placés au niveau des vertex, comme cela était le cas dans la méthode précédente, mais au niveau de l'axe médian du modèle 3D. Le procédé correspond à la détection multi-échelle de tubes et commence par traiter les plus petits en premier. La méthode [Mortara *et al.*, 2004a] est utilisée pour détecter les vertex liés à des zones de type « tube » et ainsi identifier les tubes candidats. Un procédé de génération de « boucle médiane » (*medial loop*) est ensuite utilisé pour placer une boucle fermée au milieu de chaque tube. Cette boucle correspond au générateur de caractéristiques qui, par

itérations, permet l'abstraction et l'extraction de caractéristiques tubulaires comme le squelette du tube ou un ensemble de contours. La segmentation est réalisée à l'aide de la classification des parties ayant des caractéristiques tubulaires (parties coniques ou cylindriques) et des caractéristiques « corps » (les régions qui connectent les parties tubulaires).

« Plumber » ainsi que les méthodes de [Biasotti, 2004] et de [Attene *et al.*, 2006a] ont été utilisées dans [Attene *et al.*, 2007b] et [Attene *et al.*, 2007a] pour réaliser la segmentation et l'annotation sémantique de modèles 3D.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Mortara <i>et al.</i> , 2004a]	Sphère, caractéristiques de forme définies à partir du nombre d'intersection de la sphère avec le maillage	Croissance de régions pour rassembler les vertex de même type
[Mortara <i>et al.</i> , 2004b] [Mortara <i>et al.</i> , 2006]	Sphère, tube (partie coniques ou cylindrique), corps	Classification des vertex en fonction de leurs caractéristiques

TAB. 2.10 – Caractéristiques et critères des méthodes basées sur les descripteurs de forme multi-échelles.

Le tableau 2.10 propose un résumé des caractéristiques et critères des méthodes basées sur les descripteurs de forme multi-échelles. Les méthodes classent les vertex selon un type de surface ou de partie à partir d'une sphère. Les vertex spatialement proches et de même label sont ensuite regroupés pour former des régions.

### 2.4.5 Extraction du squelette

Certaines méthodes de segmentation font intervenir le squelette d'une forme pour en déduire les différentes parties. L'axe médian (*Medial Axis*), le diagramme de Voronoï, les graphes de chocs (*shock graphs*) et les graphes de Reeb sont souvent utilisés pour représenter le squelette d'une forme. La méthode par axe médian offre une description très précise de la forme mais devient très coûteuse en temps de calcul pour des espaces de dimension supérieure à 2 [Culver *et al.*, 2004]. Certaines méthodes utilisent une approximation de l'axe médian. Le diagramme de Voronoï peut être utilisé pour approcher successivement l'axe médian à partir d'un ensemble de points échantillonnant la frontière de la forme. Les graphes de chocs [Siddiqi *et al.*, 1999][Sebastian *et al.*, 2004] sont des graphes orientés étiquetés ; ils permettent d'approximer l'axe médian par évolution

de courbes. Les graphes de Reeb font intervenir des nœuds correspondants aux points critiques d'une fonction définie sur une surface étudiée.

Certaines méthodes déterminent le squelette à partir du résultat de la décomposition [Lien et Amato, 2006][Katz et Tal, 2003]. Un squelette peut également être obtenu à partir de la simplification du maillage [Li *et al.*, 2001]. Les méthodes de squelettisation offrent des propriétés différentes en termes de reconnaissance, de reconstruction, de transformation, d'appariement et d'animation [Biasotti *et al.*, 2003].

Les méthodes de squelettisation basées sur l'amincissement topologique font généralement intervenir un espace discret où les points de contour de la forme sont successivement retirés tout en préservant la topologie de la forme. De nombreux algorithmes d'amincissement topologique sont décrits dans [Lohou, 2001]. L'auteur discute des méthodes itératives et parallèles ainsi que des points simples et  $P$ -simples qui sont des points dont la suppression ne modifie pas la topologie de l'objet.

La méthode de [Brunner et Brunnett, 2004] correspond à la voxelisation et la squelettisation d'un objet 3D pour extraire le squelette et déduire les parties significatives sur le maillage. Le squelette calculé par amincissement est transformé en graphe où les jonctions, extrémités et points isolés apparaissent comme des nœuds et les « segments », comme des arcs. Chaque arc possède un label différent. Pour réaliser la segmentation sur le maillage, les faces du maillage sont associées aux labels des voxels du squelette les plus proches. Les mêmes auteurs proposent dans [Brunner et Brunnett, 2005] une amélioration de la structure de données et une extension du concept de voisinage pour distinguer les voisins locaux et globaux.

[Brunner et Brunnett, 2006] ont souligné les limites de leur précédente méthode qui autorisaient dans certains cas une mauvaise association des faces du maillage au squelette. Ils se sont orientés, comme nous l'avons fait indépendamment dans [Delest *et al.*, 2006c], vers la mémorisation d'un chemin entre les voxels de surface et les voxels du squelette. Pour résoudre le problème des faces ambiguës (faces liées par leur vertex à des voxels de différents labels ou de type jonction), une succession de comparaisons est réalisée pour labelliser les faces par rapport aux faces voisines les plus ressemblantes.

Les méthodes que nous avons proposées dans [Delest *et al.*, 2006c] [Delest *et al.*, 2007a] sont relativement proches de celle citée précédemment. Elles utilisent cependant un concept différent en considérant les faces labélisées à partir du squelette comme des marqueurs pour la LPE. Les faces non marquées sont labélisées à partir de la LPE. La méthode correspond ainsi à une décomposition de la surface en parties le long de contours représentés par de fortes courbures.

[Raab *et al.*, 2004] utilisent le squelette de la forme 3D pour guider l'assemblage de différentes primitives. La squelettisation prend en compte la symétrie du modèle ainsi que la courbure des vertex. La création des primitives fait intervenir des contraintes comme le rayon, la longueur, la largeur, l'intersection, la symétrie, etc.

[Mademlis *et al.*, 2007] proposent de segmenter un modèle en parties significatives en se basant sur l'axe médian et sur l'extraction des caractéristiques géométriques de chaque partie. Ces caractéristiques sont combinées et leur matrice de covariance est assimilée à un descripteur de chaque partie. Un appariement partiel est réalisé à partir des parties significatives selon l'invariance à la rotation, à la translation et au changement d'échelle. La squelettisation est utilisée pour extraire les principaux segments correspondant aux parties significatives. Les voxels de surface sont associés aux segments les plus proches selon la distance euclidienne. Les carreaux de surface sont ensuite corrigés pour être uniformément distribués autour de l'axe médian.

[Reniers et Telea, 2007] segmentent hiérarchiquement un maillage polygonal à partir du squelette. Le squelette est défini par rapport à la distance géodésique à la surface [Reniers et Telea, 2008]. Les points critiques sont identifiés à partir de l'analyse du squelette ou bien manuellement. Les points critiques sont ensuite ordonnés dans un arbre où chaque nœud est associé à des contours formés par l'ensemble des chemins connectés les plus proches du nœud.

Un squelette est construit parallèlement au procédé de croissance d'un modèle déformable dans [Sharf *et al.*, 2007]. Les centres des fronts de propagation du modèle déformable définissent les éléments qui composent le squelette. Le squelette grandit ainsi au fur et à mesure que les fronts de propagation avancent. Ce squelette est ensuite filtré puis simplifié à partir d'un paramètre de tension. Les différentes branches du squelette sont utilisées pour segmenter la surface de l'objet.

Le tableau 2.11 propose un résumé des caractéristiques et critères des méthodes utilisant le squelette de la forme. Les différents segments du squelette sont généralement utilisés pour déduire les principales parties de la forme. L'association des segments d'un squelette de voxel aux faces du maillage est établie par le calcul d'une distance euclidienne ou mieux, à partir d'un chemin créé lors de la squelettisation. La méthode basée sur les modèles déformables associe directement les faces du maillage aux centres des fronts de propagation qui constituent le squelette de l'objet lorsque la croissance est stabilisée.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Brunner et Brunnett, 2004] [Brunner et Brunnett, 2005] [Mademlis <i>et al.</i> , 2007]	Segments du squelette de voxel	Association des faces aux voxels du squelette les plus proches
[Brunner et Brunnett, 2006]	Segments du squelette de voxel	Création d'un chemin reliant les vertex aux voxels du squelette les plus proches, labellisation des vertex restants par analyse de la similarité
[Delest <i>et al.</i> , 2006c] [Delest <i>et al.</i> , 2007a]	Segments du squelette de voxel, courbure	Création d'un chemin reliant les vertex aux voxels du squelette les plus proches, labellisation des vertex restants par la LPE avec marqueurs
[Raab <i>et al.</i> , 2004]	Symétrie du modèle, courbure des vertex	Rayon, longueur, largeur, intersection, limite de symétrie
[Sharf <i>et al.</i> , 2007]	Centres des fronts de propagation du modèle déformable	Tension, association des faces aux différents segments du squelette

TAB. 2.11 – Caractéristiques et critères des méthodes utilisant le squelette de la forme.

### 2.4.6 Les graphes de Reeb

Un graphe de Reeb est une structure topologique qui se définit à partir de  $f : M \subseteq \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  où  $M$  est une surface tridimensionnelle. Le graphe de Reeb de la surface  $M$  est l'espace quotient de  $f$  dans  $M \times \mathbb{R}$  par la relation d'équivalence  $(p_1, f(p_1)) \sim (p_2, f(p_2))$ , vérifiée si et seulement si :

$$\begin{cases} f(p_1) = f(p_2) \\ p_1 \text{ et } p_2 \text{ appartiennent à la même composante connexe de } f^{-1}(f(p_1)) \end{cases} \quad (2.25)$$

Un graphe de Reeb est composé de nœuds représentant les points critiques de  $f$ , c'est-à-dire les points de la surface  $M$  où les dérivées partielles de  $f$  s'annulent. La figure 2.24 représente un tore associé à une fonction de hauteur ainsi que son graphe de Reeb. Les points critiques de cette fonction sont marqués en rouge pour les minima, en vert pour les maxima et en noir pour les points selles. Plusieurs fonctions peuvent être utilisées :

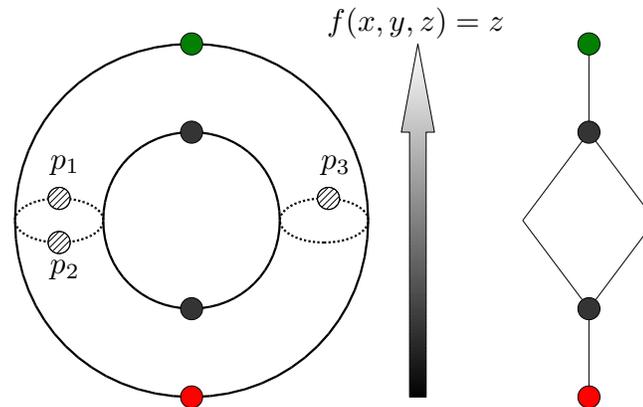


FIG. 2.24 – Un tore associé à la fonction de hauteur  $f(x, y, z) = z$  et son graphe de Reeb. Les deux points  $p_1$  et  $p_2$  appartiennent au même composant connecté, ce qui n'est pas le cas de  $p_3$ .  $(p_1, f(p_1))$  et  $(p_2, f(p_2))$  sont équivalents. Les points critiques apparaissent en couleur.

la distance à un point source [Lazarus et Verroust, 1999], l'intégrale des distances à des points sources [Hilaga *et al.*, 2001], une fonction de paramétrisation à partir de points caractéristiques [Tierny *et al.*, 2006] ou encore une solution de l'équation de Laplace [Ni *et al.*, 2004][Aujay *et al.*, 2006].

Une fonction de protrusion pour réaliser la segmentation est utilisée dans [Antini *et al.*, 2005] [Berretti *et al.*, 2006]. L'objectif est d'identifier les parties les plus saillantes en déterminant les principales protrusions. [Werghi, 2006] utilisent les graphes de Reeb sur un nuage de points pour obtenir un objet 3D segmenté. [Tierny *et al.*, 2007] font intervenir une méthode de graphe de Reeb avec une fonction de paramétrisation à partir de points caractéristiques. À partir du squelette obtenu avec le graphe de Reeb, le corps de l'objet est délimité et les jonctions sont identifiées. La segmentation est ensuite affinée et plusieurs schémas de segmentation relatifs au niveau de détails sont définis.

[Symonova et De Amicis, 2007] réalisent une segmentation hiérarchique du maillage en déterminant les contours circulaires [Attene *et al.*, 2003] par rapport aux graphes de Reeb. La segmentation hiérarchique peut être résumée par un arbre dont les nœuds sont associés aux parties. Les parties de genre non nul sont systématiquement divisées pour se réduire à des formes simples. Les graphes de Reeb sont déterminés suivant une fonction spécifique au contexte : la fonction de distance est privilégiée pour les modèles de type C.A.O, la distance au barycentre permet une segmentation robuste à la rotation et l'intégrale des distances géodésiques, une segmentation indépendante de la posture du modèle.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Antini <i>et al.</i> , 2005] [Berretti <i>et al.</i> , 2006]	Courbure moyenne, protrusion	Connexion des nœuds du graphe de Reeb
[Werghi, 2006]	Point critique, distance géodésique	Connexion des nœuds du graphe de Reeb
[Tierny <i>et al.</i> , 2007]	Point critique, distance géodésique, corps	Connexion des nœuds du graphe de Reeb, décomposition hiérarchique jusqu'à la considération d'un corps et de ses parties adjacentes
[Symonova et De Amicis, 2007]	Point critique, distance géodésique, fonction de hauteur, distance au barycentre	Connexion des nœuds du graphe de Reeb

TAB. 2.12 – Caractéristiques et critères des méthodes utilisant les graphes de Reeb.

Le tableau 2.12 propose un résumé des caractéristiques et critères des méthodes utilisant les graphes de Reeb. Pour la segmentation de maillages polygonaux, les distances géodésiques interviennent généralement dans la fonction d'application nécessaire à la construction du graphe de Reeb. Les arcs du graphe permettent d'identifier les différentes parties du maillage polygonal.

### 2.4.7 Autres méthodes

Dans le cadre d'une application de reconnaissance des formes et d'indexation de modèle 3D de C.A.O., [Rea *et al.*, 2004] ont mis en œuvre un spectre de partitionnement de surface (SPS). Cette méthode permet de caractériser la géométrie et la topologie dans un simple histogramme 2D. Le schéma de partitionnement est fonction de l'angle dièdre entre les faces. L'histogramme fait apparaître le nombre de carreaux surfaciques en fonction de l'intervalle de l'angle dièdre utilisé pour la fusion. La segmentation est réalisée un grand nombre de fois pour chaque intervalle d'angle dièdre. Pour chaque segmentation issue de la fusion, le nombre de carreaux générés est compté et placé dans l'histogramme.

Pour garantir une invariance à la pose mais aussi aux changements de connectivité des parties d'un objet 3D, [Shamir *et al.*, 2005] proposent une segmentation de maillages polygonaux en parties significatives basée sur une fonction de volume. Cette fonction fait intervenir le diamètre du volume associé au voisinage de chaque vertex. Le diamètre est calculé à partir d'un procédé de lancé de rayon. Le cône de projection dispose d'un

angle de  $120^\circ$  et le nombre de rayons est d'environ 50. Pour réduire les effets d'une mauvaise approximation de la fonction volume dans certains cas, un lissage est réalisé à partir des vertex voisins. Les iso-contours minima indiquent la présence de frontières entre des parties du modèle. La segmentation finale est réalisée à partir d'un algorithme de coupe minimum au niveau des zones de frontière.

La méthode proposée par [Cutzu, 2000] correspond à la recherche d'une décomposition en partie d'un objet 3D par l'observation de similarité parmi plusieurs vues de l'objet. L'algorithme réalise la décomposition à partir de la position des caméras pour obtenir les différentes vues et des similarités perceptuelles à rechercher dans chaque vues.

[Simari *et al.*, 2006] ont orienté leur méthode de segmentation hiérarchique par rapport à la symétrie planaire. Il existe de nombreuses redondances en termes de symétrie dans les objets 3D. Leur méthode détecte un plan de symétrie dans l'objet et construit l'arbre associé. Les demi-objets de chaque côté du plan de symétrie peuvent à leur tour être divisés à partir de nouveaux plans de symétrie. La création de nouveaux plans de symétrie implique la création de nouveaux nœuds dans l'arbre. Les niveaux de l'arbre permettent de réaliser différentes segmentations en fonction du niveau de détail recherché. Les auteurs soulignent l'importance de la symétrie, notamment dans la segmentation mais aussi dans la compression de maillage.

L'information de mouvement est utilisé dans [Sattler *et al.*, 2005], [Lee *et al.*, 2005a] et [Günther *et al.*, 2006] pour segmenter un maillage polygonal. Les chemins qu'empruntent les vertex lors d'une animation d'une certaine durée sont analysés pour déduire les frontières et les régions. [Lee *et al.*, 2006] examinent la déformation d'un maillage lors d'une animation et partitionnent un objet en composants quasi-rigides en considérant les fortes déformations comme indicateurs de frontières. [James et Twigg, 2005] utilisent le partitionnement par *mean shift* pour regrouper les faces qui ont une séquence de rotation similaire dans une animation.

Certaines méthodes réalisent la segmentation en approximant des parties par rapport à des ellipsoïdes [Simari et Singh, 2005] ou des superquadriques [Leonardis *et al.*, 1997] [Chevalier *et al.*, 2003]. [Hetroy, 2003] détectent les « étranglements » d'un maillage fermé à partir de sa simplification. La surface est décomposée en sous-parties connectées par des zones étroites.

Les caractéristiques et critères de ces méthodes sont résumés dans le tableau 2.13.

Auteurs	Caractéristiques	Critères
[Rea <i>et al.</i> , 2004]	Angle dièdre	Intervalle de l'angle dièdre associé à un nombre de carreaux dans un histogramme
[Shamir <i>et al.</i> , 2005]	Diamètre du volume associé au voisinage de chaque vertex, angle et rayon du cône de projection	Iso-contours minima
[Cutzu, 2000]	Position des caméras	Similarités perceptuelles
[Simari <i>et al.</i> , 2006]	Plan de symétrie	Coupe selon le plan de symétrie
[Simari et Singh, 2005]	Ellipsoïdes	Approximation à des primitives
[Leonardis <i>et al.</i> , 1997] [Chevalier <i>et al.</i> , 2003]	Superquadriques	Approximation à des primitives
[Hetroy, 2003]	Étranglement	Décomposition en sous-parties connectées par des zones étroites
[Sattler <i>et al.</i> , 2005] [Lee <i>et al.</i> , 2005a] [Günther <i>et al.</i> , 2006]	Mouvement	Chemins qu'empruntent les vertex lors d'une animation
[Lee <i>et al.</i> , 2006]	Déformation	Force de la déformation
[James et Twigg, 2005]	Séquence de rotation	Similarité

TAB. 2.13 – Caractéristiques et critères des autres méthodes de segmentation en parties significatives.

## 2.5 Bilan et approche proposée

La segmentation de maillages polygonaux est un domaine de recherche assez vaste. Nous avons mené dans ce chapitre une étude, se voulant plutôt exhaustive, des approches de segmentation en carreaux surfaciques et de segmentation en parties significatives. Une multitude d'applications de segmentation de maillages polygonaux existent, c'est pourquoi il est difficile d'établir une comparaison générale des méthodes comme le soulignent [Attene *et al.*, 2006b]. La forme de carreaux est guidée par des contraintes de paramétrisation, de planéité, de courbure, etc. Les carreaux peuvent aussi intervenir comme des parties d'un objet qui a été décomposé en suivant des lois de la perception humaine. Nous avons proposé pour chaque famille de méthode un résumé des caractéristiques et critères utilisés dans les différents travaux.

Applications	Méthodes	Caractéristiques
Compression	Croissance de régions, analyse spectrale	Nombre de sommets et d'arêtes partagés par plusieurs carreaux, courbure, ellipsoïde
Remaillage et simplification	Partitionnement itératif, partitionnement hiérarchique, LPE, décomposition en parties convexes	Planéité, ellipsoïde, convexité
Paramétrisation	Croissance de régions, analyse spectrale	Distorsion, discontinuité entre les carreaux
Application de texture	Partitionnement hiérarchique, croissance de régions	Distorsion, discontinuité entre les carreaux, déformation, texture, distance aux contours
Métamorphose	Partitionnement itératif, LPE	Courbure, angle dièdre, points critiques et protrusions
Détection de collision	Partitionnement hiérarchique	Convexité, points critiques
Rétro-ingénierie	Croissance de régions, LPE, partitionnement itératif	Courbure, absoïde, superquadrique, convexité, primitive géométrique, mouvement de glissement
Interfaces de dessins	Croissance de régions, modèles déformables	Loi de minima, saillance des parties, coque convexe
Reconnaissance de formes	LPE, analyse spectrale, squelettisation, graphes de Reeb	Courbure, loi de minima, saillance des parties, points critiques et protrusions, sphères pour les descriptions de forme multi-échelles, squelette
Radiosité	Partitionnement hiérarchique	Planéité, volume englobant, aire
Tatouage numérique	Croissance de régions, partitionnement itératif	Protrusion, distance géodésique

TAB. 2.14 – Méthodes et caractéristiques généralement utilisées pour les applications.

Le tableau 2.14 résume les principales méthodes et caractéristiques intervenant dans les différentes applications utilisant la segmentation de maillages polygonaux. Ces applications nécessitent des approches de segmentation particulières. La LPE intervient par exemple pour les applications de reconnaissance de formes, de rétro-ingénierie ou de métamorphose.

Pour une application donnée, la segmentation de maillages polygonaux intervient dans une chaîne de traitement plus ou moins complexe. Par exemple, la méthode de [Zuckerberger *et al.*, 2002] permet la décomposition du maillage à partir de la LPE ; le résultat de la segmentation est ensuite utilisé dans une application de reconnaissance de formes où les carreaux sont évalués et leurs relations sont déterminées. Chaque décomposition est représentée sous la forme d'un graphe d'attributs qui s'interprète comme une signature pour reconnaître un objet à partir d'une base de données.

Nos travaux portent sur la segmentation de maillages polygonaux à partir de la ligne de partage des eaux. Nous avons vu au travers de cet état de l'art qu'il existe un petit nombre de méthodes réalisant la segmentation de maillages polygonaux à partir de la LPE. La LPE est un procédé de segmentation simple mais efficace pour laquelle de nombreuses pistes restent à explorer sur la fonction de hauteur, la segmentation hiérarchique ou encore les marqueurs. Nous avons mené des recherches sur ces thématiques et abouti à des méthodes originales de segmentation.

Dans les chapitres suivants, nous traitons de la méthode de ligne de partage des eaux, de la fonction de hauteur, des procédés pour limiter la sur-segmentation que nous avons mis en œuvre ainsi que des résultats.

# Chapitre 3

## Segmentation par ligne de partage des eaux

La ligne de partage des eaux (LPE) est une méthode de segmentation très utilisée pour les images 2D. Son principe repose sur le concept physique d'inondation. La LPE désigne une limite géographique qui divise une région en plusieurs bassins versants. En morphologie mathématique, la LPE est un algorithme de segmentation dont l'objectif est la décomposition d'une image ou d'un objet en régions homogènes.

Certaines méthodes de segmentation de maillages polygonaux utilisent la LPE pour réaliser la séparation des régions. Même si, appliquée au maillage polygonal, la LPE devient moins intuitive, elle reste cependant une méthode simple, flexible et efficace. La section suivante présente le principe de la LPE appliquée aux images 2D. La section 3.2 concerne l'étude des différentes approches de la LPE. La section 3.3 traite des solutions pour limiter la sur-segmentation de la LPE et la section 3.4 présente la méthode de segmentation par LPE utilisée dans nos travaux.

### 3.1 Principe de la ligne de partage des eaux

La LPE utilise la description des images ou objets en termes géographiques. La notion de LPE n'est pas purement issue de la morphologie mathématique ; son origine provient de la topographie et de l'hydrogéologie. La thèse de [Beucher, 1990] représente une étude incontournable de la LPE où les fondements mathématiques sont introduits. Nos travaux concernent l'implémentation d'un algorithme performant de LPE 3D, la recherche d'une

fonction de hauteur adaptée et l'étude de stratégies pour éviter la sur-segmentation.

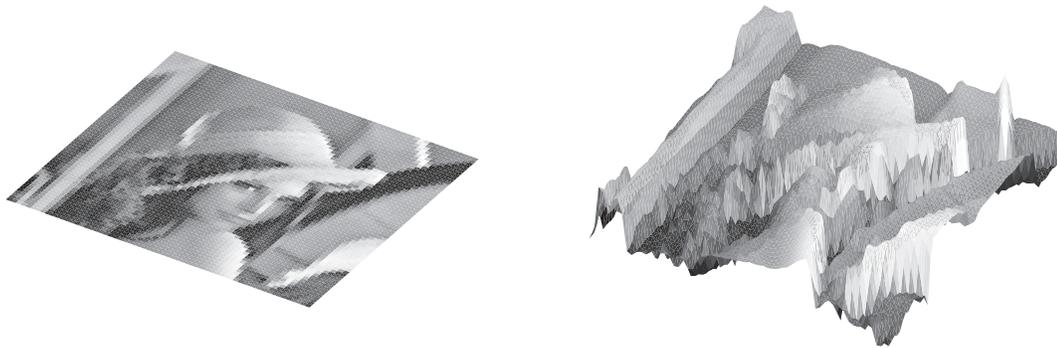


FIG. 3.1 – Image de Lena à gauche et le relief généré à partir des niveaux de gris à droite.

L'exemple typique du procédé de LPE correspond à l'association d'une image à un relief, où les niveaux de gris de l'image représentent l'altitude (voir figure 3.1). La LPE correspond à la crête formant la limite entre les deux bassins. L'exemple monodimensionnel de la figure 3.2 représente une ligne d'une image, composée de pixels (points) et dont l'intensité des niveaux de gris correspond à la hauteur de points. Les minima sont les pixels ou les plateaux de pixels n'ayant pas de voisin de hauteur plus petite. Ils peuvent être utilisés pour initialiser le processus de LPE. Les bassins versants correspondent aux zones de pixels, appartenant potentiellement à un bassin, et qui vont être inondées. La LPE par inondation peut être interprétée comme l'immersion progressive d'un relief dans de l'eau. Le relief est percé au niveau des minima ou bien des marqueurs s'ils ont été définis. L'eau s'écoule à partir des minima ou des marqueurs et remplit les bassins. Pour empêcher la réunion de deux bassins, une digue de séparation est construite en chaque point de contact. La LPE correspond à l'union de toutes les digues.

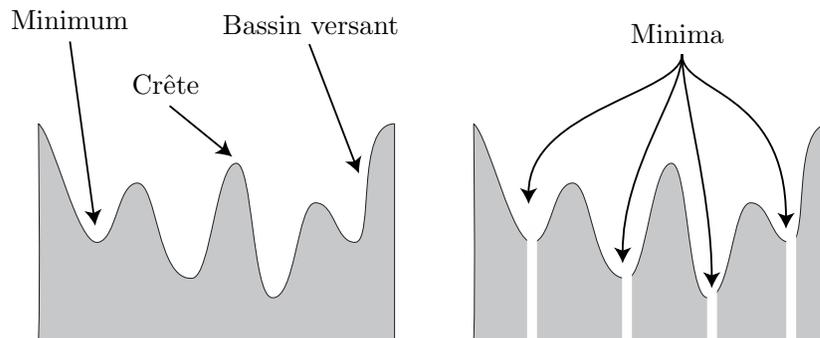


FIG. 3.2 – Exemple monodimensionnel d'un relief composé de bassins versants, de crêtes et de minima. Le relief est percé au niveau des minima sur la figure de droite.

La définition de la ligne de partage des eaux en terme d'inondation (approche ascendante) permet l'interprétation directe de l'algorithme. Le principe repose sur la reconstruction des seuils successifs d'une fonction  $f$  à l'aide du squelette par zone d'influence géodésique (SKIZ) [Prêteux, 1992][Prêteux, 1993].

Soit  $f$  une fonction et  $Z_i(f)$ , l'ensemble des points  $x$  d'altitude  $f(x)$  inférieure ou égale à  $i$ .

$$Z_i(f) = \{x : f(x) \leq i\} \quad (3.1)$$

Soit  $i_0$  la plus petite altitude correspondant à un seuil  $Z_i(f)$  non vide.  $Z_{i_0}(f)$  peut avoir plusieurs composantes connexes, chacune d'elles étant alors par définition un minimum local de  $f$ . Pour  $Z_{i_0+1}(f)$ , le seuil immédiatement supérieur, nous avons :

$$Z_{i_0}(f) \subset Z_{i_0+1}(f) \quad (3.2)$$

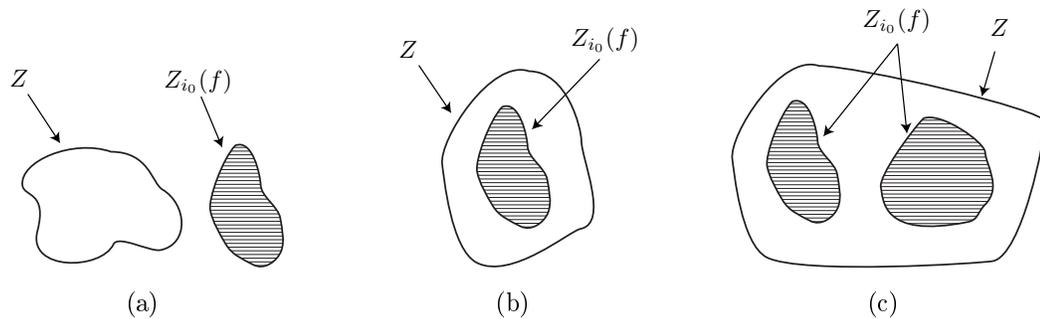


FIG. 3.3 – Les trois relations d'inclusion possibles entre  $Z$  et  $Z_{i_0}(f)$ .

Soit  $Z$  une composante connexe de  $Z_{i_0+1}(f)$ . Il existe trois relations possibles entre  $Z$  et  $Z_{i_0}(f)$  :

- $Z \cap Z_{i_0}(f) = \emptyset$  :  $Z$  est un minimum régional de  $f$  à l'altitude  $i_0$  (figure 3.3(a)).
- $Z \cap Z_{i_0}(f)$  est non vide et connexe :  $Z$  représente le niveau  $(i_0 + 1)$  du lac produit par l'inondation du minimum régional de  $Z_{i_0}(f) \cap Z$  (figure 3.3(b)).
- $Z_{i_0}(f) \cap Z$  est non vide et formé de plusieurs composantes connexes :  $Z$  correspond à la réunion des eaux provenant des différents minima régionaux composant  $Z_{i_0}(f) \cap Z$ . Cette jonction n'étant pas autorisée, une LPE est construite pour séparer les différents lacs (figure 3.3(c)).

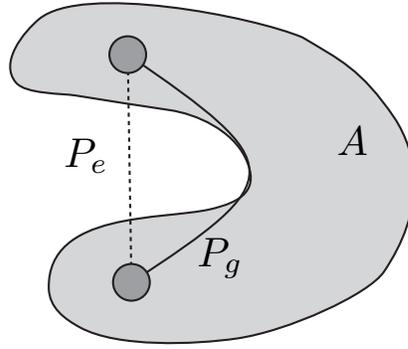


FIG. 3.4 – La distance géodésique  $P_g$  entre  $x$  et  $y$  à l'intérieur de  $A$  correspond au chemin (compris dans  $A$ ) le plus court entre ces deux points. la distance  $P_e$  correspond à la distance euclidienne.

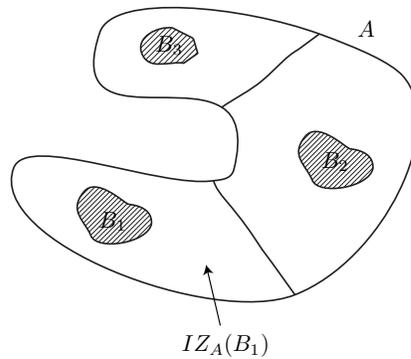


FIG. 3.5 – Zones d'influence géodésiques.  $IZ_A(B_1)$  correspond à la zone d'influence géodésique de l'élément  $B_1$  dans l'ensemble  $A$ .

La création de LPE fait intervenir la construction de zones d'influences géodésiques de  $Z_{i_0}(f) \cap Z$  dans  $Z$ . La distance géodésique  $d_A(x, y)$  entre deux points  $x$  et  $y$  correspond au chemin le plus court, inclus dans  $A$ , reliant  $x$  et  $y$  (voir figure 3.4).

Soit  $A$ , un ensemble contenant un ensemble  $B$  composé des éléments  $B_1, B_2, \dots, B_k$ . La figure 3.5 illustre la zone d'influence géodésique de l'élément  $B_i$  de  $B$  dans  $A$ . Cette zone d'influence géodésique se définit comme une collection de points dans  $A$  qui partagent la propriété d'avoir une distance géodésique à  $B_i$  plus petite que la distance géodésique à n'importe quel autre élément de  $B$  :

$$IZ_A(B_i) = \{p \in A, \forall j \in [1, k] / \{i\}, d_A(p, B_i) < d_A(p, B_j)\} \quad (3.3)$$

Certains points ne peuvent pas être associés à une zone d'influence géodésique car ils sont à une distance égale des deux éléments de  $B$ . Ils constituent le squelette par zone d'influence (SKIZ) de  $B$  dans  $A$ , noté  $SKIZ_A(B)$  :

$$SKIZ_A(B) = A / IZ_A(B) \text{ avec } IZ_A(B) = \bigcup_{i=1}^k IZ_A(B_i) \quad (3.4)$$

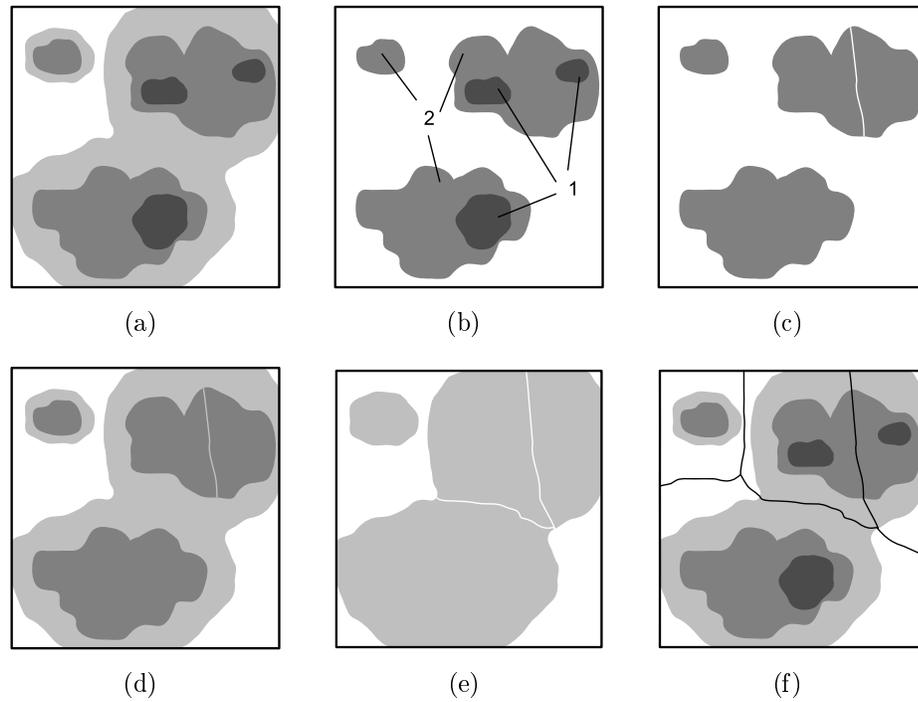


FIG. 3.6 – Exemple de LPE par inondation. (a) Image initiale, (b) minima 1 et niveau suivant 2, (c) SKIZ géodésique de 1 dans 2, (d) niveau 2 diminué du 1<sup>er</sup> SKIZ et niveau 3, (e) 2<sup>e</sup> SKIZ, (f) LPE finale. (Image inspirée de [Serra, 2000])

Il est à remarquer que le SKIZ géodésique de  $B$  dans  $A$  ne sépare pas toujours les différentes zones d'influence géodésiques de façon hermétique. Le cas de deux points voisins ayant pu être associés à des zones d'influence géodésiques différentes en est un exemple. Chaque zone d'influence constitue un bassin versant associé à chaque minimum régional de  $Z_{i_0}(f) \cap Z$ . La figure 3.6 propose un exemple des différentes étapes de la construction de la LPE. A partir des minima de niveau 1, le SKIZ géodésique de 1 dans le niveau 2 est calculé. Le SKIZ est ensuite soustrait du niveau 2 qui compte alors quatre minima. Le SKIZ géodésique du niveau 2 dans 3 apparaît à l'étape (e) sur la figure 3.6. La dernière figure représente la ligne de partage des eaux. Ces différentes étapes sont formalisées dans l'algorithme 5 avec les considérations suivantes :

- $m_0(f)$  désigne les minima de  $f$  à l'altitude 0 et  $W_0$ , la section des bassins versants de  $f$  au même niveau.
- $m_i(f)$  représente les minima de  $f$  à l'altitude  $i$ . Il s'agit de la différence entre le seuil  $i$  et la reconstruction géodésique  $R_{Z_i(f)}$  du seuil  $i - 1$ .
- $[SKIZ_{Z_i(f)}(W_{i-1})]$  représente le squelette par zone d'influence géodésique de  $W_{i-1}$ , section des bassins versants de  $f$  au niveau  $i - 1$  dans le seuil de  $f$  au niveau  $i$ .
- $W_N$  représente les bassins versant de  $f$ .

---

**Algorithme 5** : Construction de la LPE ([Beucher, 1990])
 

---

```

début
  |  $W_0 = m_0(f)$ 
  | pour  $i \leftarrow 1$  à  $N$  faire
  |   |  $m_i(f) = Z_i(f)/R_{Z_i(f)}(Z_{i-1}(f))$ 
  |   |  $W_i = [SKIZ_{Z_i(f)}(W_{i-1})] \cup m_i(f)$ 
  |   |  $LPE(f) = W_N^c$ 
  | fin

```

---

## 3.2 Les différentes mises en œuvre

La LPE est apparue dans les travaux de [Digabel et Lantuéjoul, 1978] et de [Beucher et Lantuéjoul, 1979]. Cet outil est très populaire en segmentation d'images 2D. Les caractéristiques utilisées sont les niveaux de gris, le gradient, la texture, etc. La LPE est classée parmi les méthodes de segmentation basées « régions ». [Roerdink et Meijster, 2001] ont proposé une étude des différentes approches de segmentation d'images 2D par LPE. Les principales familles de méthodes sont abordées dans cette section.

### 3.2.1 La LPE par immersion

Un algorithme de LPE par simulation d'immersion a été proposé dans [Vincent et Soille, 1991]. Soit  $f : D \rightarrow \mathbb{N}$ , une image digitale en niveau de gris, avec  $h_{min}$  et  $h_{max}$  les valeurs minimum et maximum de  $f$ . Les minima de  $f$  sont associés à des bassins qui vont successivement grandir durant le procédé d'immersion. Soit l'ensemble  $X_h$  l'union des bassins calculés au niveau  $h$ . Un élément connecté au seuil  $Z_{h+1}$  au niveau  $h + 1$  peut être soit un minimum, soit une extension d'un bassin du niveau  $X_h$ . Le dernier cas entraîne le calcul de la zone d'influence géodésique de  $X_h$  à l'intérieur de  $Z_{h+1}$ . Il en résulte la mise à jour  $X_{h+1}$ . Soit l'ensemble  $MIN_h$  l'union de tous les minima à l'altitude  $h$ . Le même bloc d'instruction pour un niveau  $h$  variant de  $h_{min}$  à  $h_{max}$  :

$$\begin{cases} X_{h_{min}} &= \{p \in D | f(p) = h_{min}\} = Z_{h_{min}} \\ X_{h+1} &= MIN_{h+1} \cup (IZ_{Z_{h+1}}(X_h) \setminus Z_h), \quad h \in [h_{min}, h_{max}-1] \end{cases} \quad (3.5)$$

La ligne de partage des eaux de  $f$  correspond au complément de  $X_{h_{max}}$  dans  $D$  :

$$LPE(f) = D \setminus X_{h_{max}}$$

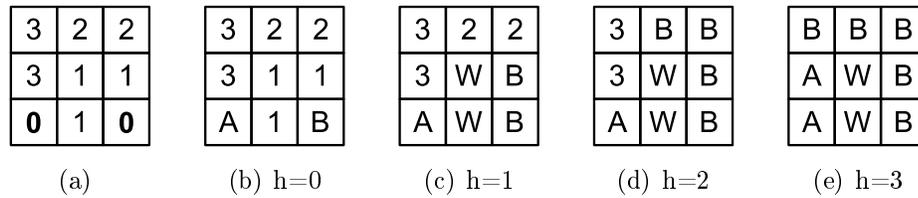


FIG. 3.7 – LPE par immersion sur une grille d’éléments 4-connectés. (a) : Image d’origine, (b-e) : Étapes de labellisation suivant l’algorithme 3.5 où  $A$  et  $B$  sont des labels de régions et  $W$ , le label de la LPE (Exemple tiré de [Roerdink et Meijster, 1997])

La figure 3.7 propose un exemple de labellisation d’une image. L’illustration 3.7(a) correspond à l’image initiale dont les minima apparaissent en gras. Les autres figures définissent les niveaux d’inondation de  $h = 0$  à  $h = 3$ . Le terme «  $Z_h$  » de l’équation 3.5 assure qu’au niveau  $h + 1$ , seuls les pixels dont l’intensité correspond à  $h + 1$  sont ajoutés aux bassins existants. Cet algorithme ne garantit pas un SKIZ entièrement connecté comme le montre la figure 3.7(e) où les pixels d’intensité 3 ont pu être associés aux bassins les plus proches.

L’implémentation correspond, dans un premier temps, au tri des pixels par ordre croissant d’intensité et, dans un deuxième temps, à l’inondation niveau par niveau à partir des minima. Le procédé fait intervenir une file d’attente FIFO. L’algorithme traite les pixels niveau par niveau, de  $h_{min}$  à  $h_{max}$ . Les pixels de la file d’attente sont analysés par rapport aux labels de leurs voisins. Lorsqu’un pixel de même niveau d’intensité non labellisé est rencontré, il est considéré comme appartenant à un plateau et est inséré dans la file derrière le pixel fictif qui signale une distance géodésique supérieure (voir figure 3.8).

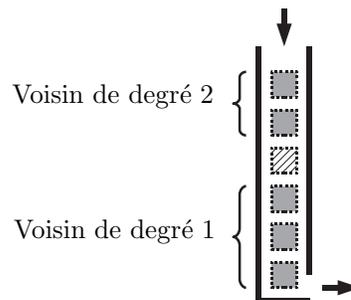


FIG. 3.8 – File d’attente FIFO pour le traitement des pixels de niveau  $h$ . Les différents fronts de propagation sont séparés par un pixel fictif (hachuré dans l’exemple).

Pour éviter les difficultés liées aux éléments connectés de même niveau (plateaux), [Meijster et Roerdink, 1995] ont proposé de transformer l’image en graphe. L’algorithme correspond à une version simplifiée de [Vincent et Soille, 1991] où l’utilisation de files

d'attente FIFO n'est plus nécessaire en raison de la disparition des plateaux remplacés par des représentants. L'image peut être considérée comme un graphe  $(V, E, f)$  où  $V$  correspond à l'ensemble des sommets du graphes,  $E$  à l'ensemble des arêtes et  $f(p)$  à la fonction de hauteur utilisant l'intensité des pixels. Chaque pixel est associé à un sommet de  $V$  et est relié à un pixel voisin par une arête de  $E$ . Un nouveau graphe  $(V^*, E^*, f^*)$  est créé en considérant que tous les pixels connectés d'un ensemble  $C_h$  au niveau  $h$  sont représentés par un simple sommet  $v \in V^*$ . Ce sommet est défini par  $v = \{p \in V | p \in C_h\}$  avec  $f^*(v) = h$ . Une paire  $(v, w)$  est un élément de  $E^*$  si et seulement si  $\exists(p \in v, q \in w) | (p, q) \in E \wedge f(p) < f(q)$ . La LPE peut être calculée directement à partir du graphe. Le résultat correspond à une image binaire où certains pixels sont labélisés LPE et d'autres non.

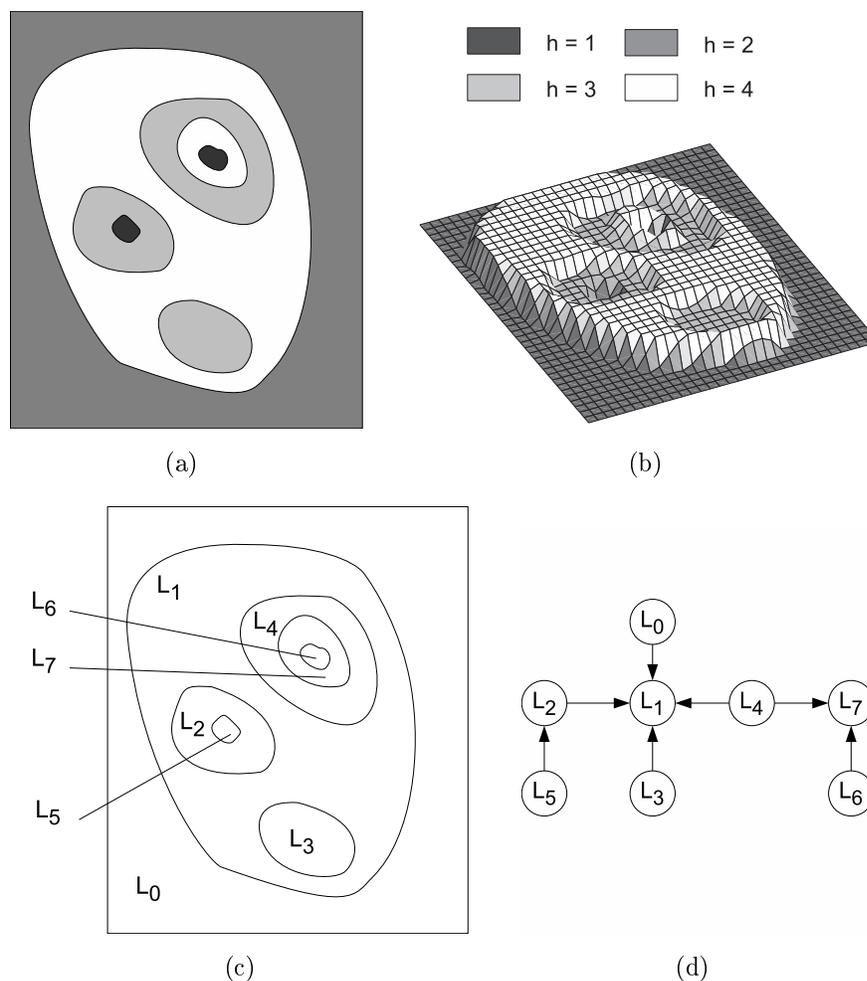


FIG. 3.9 – Création du graphe des ensembles. (a) Image initiale, (b) relief correspondant, (c) ensembles de niveaux étiquetés et (d) graphe des ensembles.

Les figures 3.9 et 3.10 illustrent les différentes étapes de création du SKIZ géodésique à partir d'une image en niveaux de gris. Un graphe orienté des ensembles de niveaux

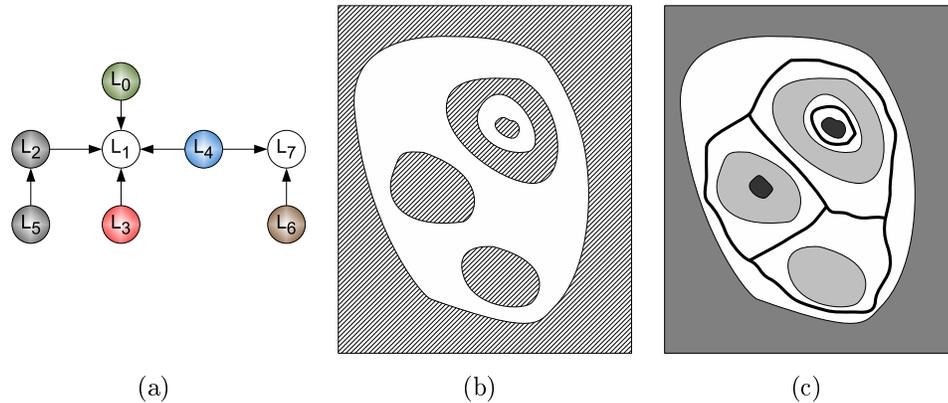


FIG. 3.10 – Création de la LPE à partir du graphe des ensembles. (a) le graphe labellisé par la LPE, (b) l'image binaire où les plateaux LPE apparaissent en blanc et (c) le SKIZ calculé à partir de l'image binaire.

est construit. Les nœuds associés aux arcs exclusivement sortants correspondent aux minima. Le procédé de LPE est utilisé sur ce graphe et lorsqu'un nœud peut être atteint par différents bassins, ce nœud est marqué comme LPE. Si un nœud est atteint par des bassins de même label, ce nœud adoptera le label de ces bassins et appartiendra à l'ensemble des éléments non LPE. Il en résulte une image binaire, avec des éléments LPE ou non, à partir de laquelle le SKIZ géodésique pourra être calculé.

### 3.2.2 La LPE par distance topographique

Il existe plusieurs méthodes de calcul de LPE basées sur l'algorithme du plus court chemin. Les nœuds pour lesquels la plus courte distance topographique est connue peuvent être ordonnés selon leur distance. Les deux principales familles de méthodes sont :

- **L'intégration** de la pente la plus faible d'une image, par propagation des distances à partir des minima. Les distances sont liées à la plus faible pente de l'image par rapport à la fonction de coût.
- **L'ascension de colline** : les distances géodésiques entre les points d'un bassin et le minimum associé sont les chemins de plus forte pente. Le processus de LPE utilise les étapes suivantes : l'attribution d'un label différent à tous les minima puis la labellisation de tous les pixels  $q$  voisins de  $p$  dont la pente est la plus forte par le label de  $p$  à partir des pixels adjacents aux minima. Si le pixel  $q$  a déjà un label et que celui-ci est différent de  $p$ , alors  $q$  est marqué comme LPE.

L'implémentation correspondant à l'**intégration** peut faire intervenir une structure de données composée de files d'attente hiérarchiques (FAH) ordonnées par priorité d'intensité [Meyer, 1991]. Ainsi la première file permettra le stockage des éléments dont l'intensité est la plus faible ; la dernière contiendra ceux d'intensité la plus forte. La figure 3.11 présente le principe de fonctionnement de la LPE par FAH. A l'initialisation, les minima (ou marqueurs) sont empilés en fonction de leur intensité. Il s'ensuit une succession d'extraction d'éléments de la file de plus forte priorité, de la labellisation de ses voisins à partir de son label, puis de l'empilement de ses voisins dans les files correspondant à leur intensité. [Beucher, 2004] a proposé récemment un algorithme de ligne de partage des eaux sans biais basé sur les files d'attente hiérarchique pour corriger le biais lié à l'ordre de traitement des pixels. La méthode utilise des files d'attente intermédiaires pour gérer correctement la propagation des labels sur les zones plates et ne valide un label qu'une fois les voisins visités.

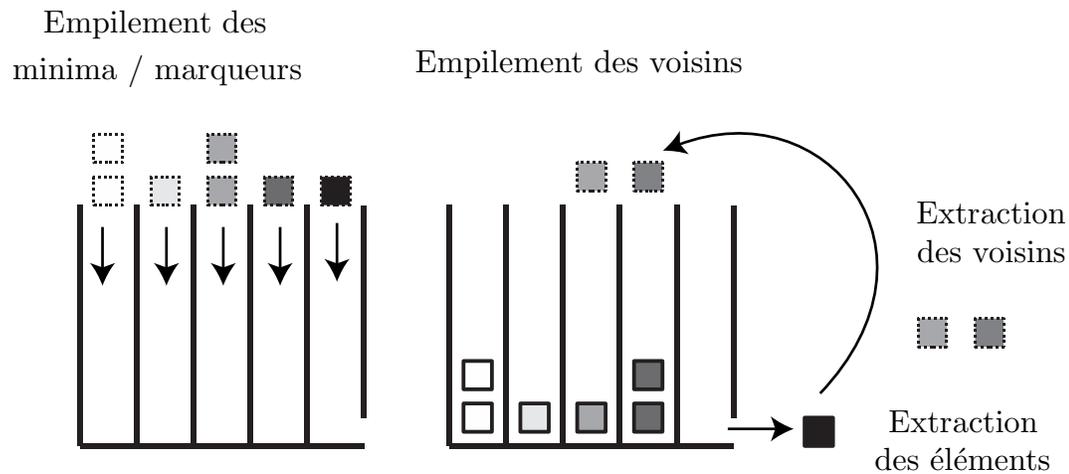


FIG. 3.11 – Fonctionnement d'une file d'attente hiérarchique. L'extraction ne peut se faire qu'à partir de la file la plus prioritaire.

Comparé à l'algorithme précédent, « **l'ascension de colline** » est plus simple du fait qu'il n'y a pas de distance à calculer. Les labels sont simplement propagés à partir des voisins ayant la plus forte pente. Si une image ne contient pas de plateau non minima, l'algorithme par ascension de colline est adapté. Dans le cas contraire, l'approche par intégration est souhaitable. La pente de descente se définit par :

$$pente(p, q) = \left( \frac{f(p) - f(q)}{dist(p, q)} \right), \forall q \in N(p) \quad (3.6)$$

où  $p$  et  $q$  sont des pixels voisins dans l'image et  $N(p)$  correspond au voisinage de  $p$ . La pente de descente maximale (*lower slope*) de la fonction  $f$  au point  $p$  est définie en tout point non minimum par :

$$LS(p) = \max_{f(q) \leq f(p)} (pente(p, q)) \quad (3.7)$$

L'ensemble des voisins inférieurs de  $p$  pour lesquels la pente est maximale est noté  $\Gamma(p)$  :

$$\Gamma(p) = \{q \in N(p) \mid \text{pente}(p, q) = LS(p)\} \quad (3.8)$$

Un plateau correspond à un ensemble d'éléments connexes de même altitude. Un plateau est « minimum » s'il est constitué d'éléments minima régionaux. Soit  $\delta_P^-$  la frontière inférieure d'un plateau non-minimum  $P$  comprenant des éléments frontières ayant au moins un voisin d'altitude inférieure. Pour les éléments à l'intérieur d'un plateau, l'extension de la définition du voisin de plus grande pente peut être utilisée avec la distance géodésique remplacée par le temps de transit minimum de l'étiquette d'un élément  $q$  de  $\delta_P^-$  à un élément intérieur de  $P$ . Ceci permet de déterminer la direction d'inondation sur les plateaux non-minima. La ligne de plus grande pente correspond au chemin  $\pi = (p_0 = p, p_1, \dots, p_l = q)$  reliant  $p$  et  $q$  tel que pour tout élément non intérieur  $p_{i+1}$  du chemin,  $\Gamma(p_{i+1}) = p_i$ .

Il existe de nombreux algorithmes de LPE. Certains sont spécifiques au type d'implémentation, séquentiel ou parallèle. On pourra se référer à [Roerdink et Meijster, 2001] pour une étude plus large des algorithmes de LPE sur les images 2D. Pour améliorer la qualité de la LPE, certaines méthodes font intervenir les contours actifs [Nguyen *et al.*, 2003] [Beare, 2006]. La LPE produit généralement trop de régions. Nous présentons dans la section suivante les différentes stratégies pour éviter ou corriger cette sur-segmentation.

### 3.3 La sur-segmentation

La sur-segmentation provient des nombreux minima dans une structure (image, maillage, etc.). Chacun d'eux donne naissance à une région. Le filtrage permet de réduire le nombre de minima et évite ainsi le calcul d'un trop grand nombre de régions. Cette solution est loin de convenir à tous les cas. D'autres outils particulièrement puissants, adaptés à différentes problématiques, existent.

La LPE peut ainsi être contrainte par des marqueurs, c'est-à-dire par des zones spécifiques dont on connaît l'appartenance à une région. Les marqueurs vont permettre d'imposer la présence de certains bassins versants pour contraindre la topologie de la LPE. La définition de ces marqueurs peut être manuelle ou bien automatique comme nous le verrons à la section 5.2 où le squelette de la forme permet de repérer des marqueurs.

Les méthodes de seuillage au niveau des bassins ou bien des contours sont généralement utilisées si certaines zones ne peuvent être connues à l'avance. La morphologie mathématique fait intervenir l'opérateur  $h$ -minima qui permet d'effectuer un filtrage à partir d'un critère basé sur la « profondeur » des minima régionaux. Un minimum ayant une profondeur inférieure à un seuil  $h$  sera éliminé. Ainsi, les minima les plus significatifs pourront être considérés comme des marqueurs pour la LPE. Le seuillage peut également être effectué sur le résultat de la segmentation : les LPE entre régions peuvent être caractérisées à partir d'une profondeur ou d'une dynamique. Cette méthode revient à fusionner les régions séparées par une LPE dont le critère est inférieur à un seuil.

Serge Beucher a introduit les cascades dans [Beucher, 1994]. Cette approche est basée sur une segmentation hiérarchique dont l'objectif est de fusionner les régions adjacentes créées par la LPE, appartenant à des zones presque homogènes.

Les sections suivantes détaillent les différentes stratégies pour éviter la sur-segmentation. Certaines de ces stratégies ont été adaptées aux maillages polygonaux. La section 5 traite de ces différentes solutions.

### 3.3.1 La LPE contrainte par les marqueurs

Les marqueurs représentent une solution très efficace s'il existe une connaissance *a priori* sur les zones à segmenter. Ils remplacent les minima et deviennent les nouvelles sources d'inondation. La figure 3.12 décrit les différentes étapes du procédé de segmentation de la LPE par inondation à partir des marqueurs ou des minima. Le nombre de régions correspond au nombre de sources d'inondation différentes ; dans le cas des marqueurs, il est courant que des marqueurs éloignés soient associés aux mêmes eaux (labels).

La figure 3.13 montre les différentes étapes de la segmentation d'une image avec la LPE contrainte par les marqueurs. Dans cet exemple, les marqueurs ont été définis manuellement et représentent différentes régions. Chaque marqueur correspond à une ensemble de pixels connectés. L'image subit une transformation de type gradient puis la LPE contrainte réalise la segmentation à partir du gradient de l'image.

La figure 3.14 représente un procédé de segmentation à partir de marqueurs issus de la fonction de distance au fond de l'image. Les bassins versants sont situés sur un relief correspondant à l'opposé de la fonction de distance ; les minima sont associés aux points les plus éloignés.

La LPE avec marqueurs est un outil puissant utilisé dans de nombreuses applications

plutôt spécifiques. Elle peut être employée dans le cadre de la segmentation interactive pour extraire un objet du fond ou partitionner l'image en plusieurs régions (figure 3.13). La segmentation de « grains de café » à partir de marqueurs issus de la fonction de distance (figure 3.14) est un des nombreux exemples de segmentation par LPE avec marqueurs proposés dans [Beucher, 1990].

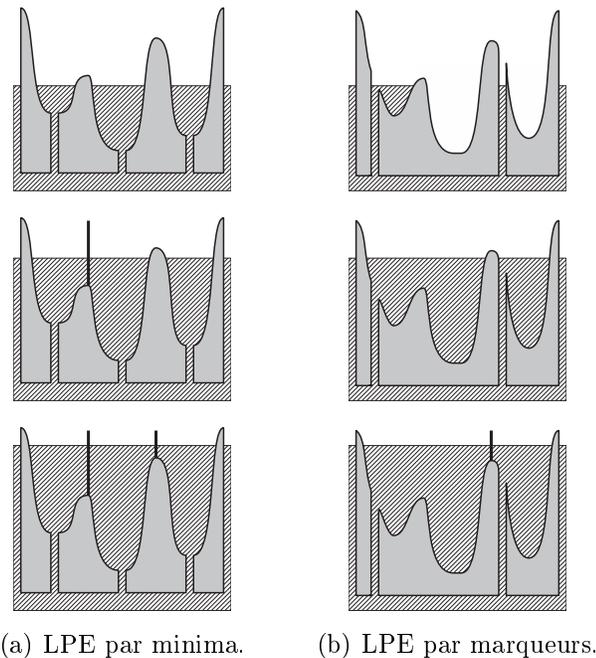


FIG. 3.12 – Exemples monodimensionnels de la LPE par minima et par marqueurs.

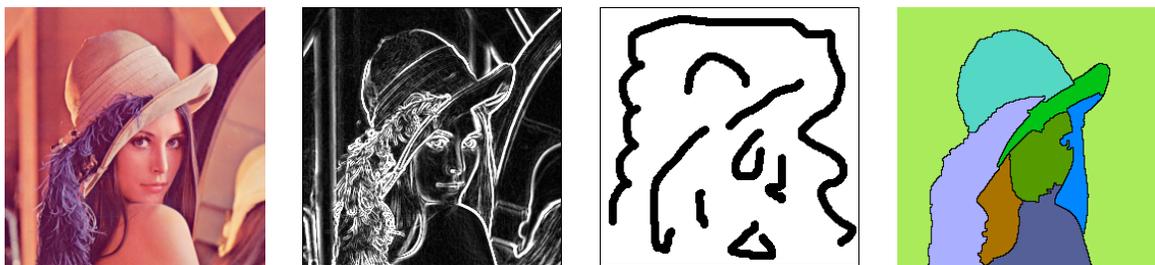


FIG. 3.13 – LPE contrainte par les marqueurs. De gauche à droite : l'image de Lena, le gradient de l'image, les marqueurs définis manuellement et le résultat de la LPE contrainte par les marqueurs.

La problématique d'extraction de marqueurs automatique a été abordée dans [Hill *et al.*, 2003] pour la segmentation d'images texturées, dans [Neves *et al.*, 2003] pour les images infrarouges, dans [Gatica-Perez *et al.*, 2001] pour les images couleur, etc.

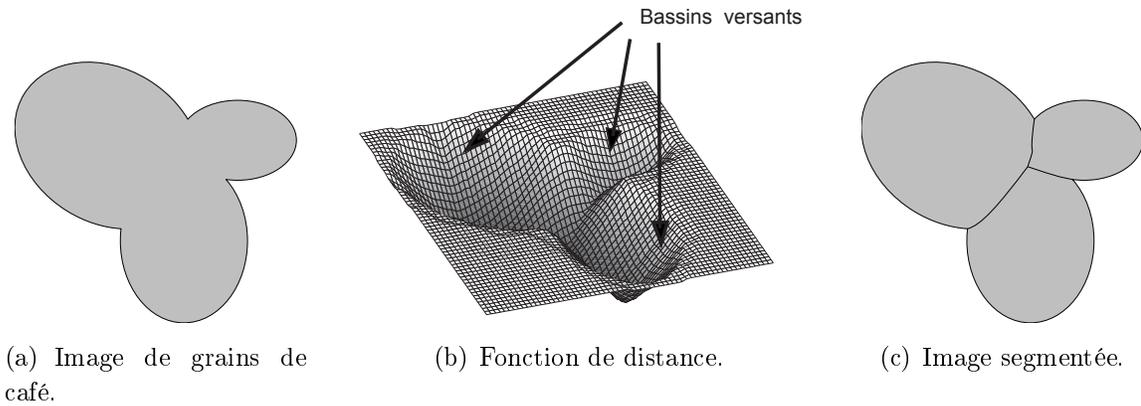


FIG. 3.14 – Segmentation de « grains de café » à partir de marqueurs issus de la fonction de distance. Les points les plus éloignés du bord de l’objet sont considérés comme marqueurs.

### 3.3.2 Segmentation hiérarchique et cascades

#### Les images mosaïques

La sur-segmentation peut être évitée en opérant une segmentation hiérarchique. Serge Beucher a proposé de réaliser plusieurs itérations de la LPE sur des images mosaïques. Il s’agit d’images simplifiées générées à partir de la LPE où chaque région obtient le niveau de gris du minima de la fonction gradient associée.

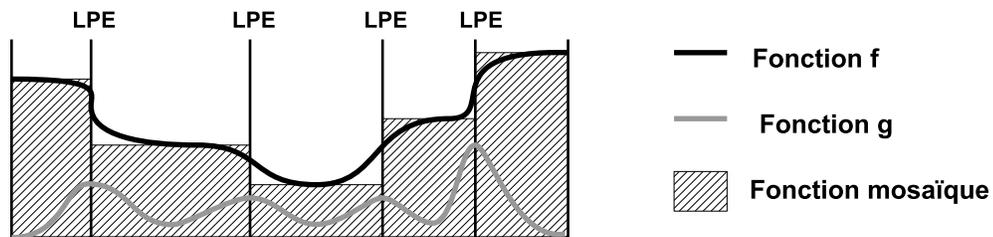


FIG. 3.15 – Principe de construction d’une image mosaïque.

L’image mosaïque peut se construire à partir de la LPE du gradient  $g$  de la fonction image  $f$ . A chaque bassin versant  $BV_i$  est associé un minimum  $m_i$  du gradient. A ce minimum correspond une valeur de niveau de gris constante  $f_i$  sur la fonction initiale :

$$\forall x \in m_i, f(x) = f_i \quad (3.9)$$

Une nouvelle fonction  $f'$  peut se définir en affectant à chaque  $BV_i$  la valeur  $f_i$  obtenue précédemment. La fonction  $f'$  correspond à « l’image mosaïque » également appelée

« image partition » [Beucher, 1990]. Cette simplification transforme l'image initiale en une fonction étagée, un relief en terrasses. Cette nouvelle image présente un meilleur contraste que l'image initiale car chaque contour apparaît alors comme une marche d'escalier. Cette transformation permet d'utiliser sur les images en niveaux de gris des opérations morphologiques définies sur les graphes [Vincent, 1989].

La figure 3.16 montre un exemple de construction d'une image mosaïque. Le LPE du gradient est dans un premier temps calculée puis le pixel correspondant au minimum du gradient de chaque région est localisé. Ce pixel donne alors son niveau de gris à sa région entière.

Le graphe dual de la partition peut se formaliser à partir de sommets  $Z_i$  reliés par des arêtes  $D_{ij}$ . Les sommets représentent les bassins  $BV_i$  et ont une valuation  $f_i$ . L'utilisation de graphe peut conduire à la segmentation hiérarchique de l'image en contractant certaines arêtes ; cependant Beucher propose d'utiliser un autre graphe généré à partir d'une nouvelle transformation sur  $f'$  : « le gradient mosaïque » (figure 3.17). En considérant deux bassins versants  $BV_i$  et  $BV_j$ , valués respectivement  $f_i$  et  $f_j$ , on peut affecter à chaque élément d'arc  $C_{ij}$  une valeur égale à  $h(C_{ij}) = |f_i - f_j|$ . La fonction  $h$  définie sur tout élément d'arc LPE est le gradient de l'image mosaïque. A partir de l'image mosaïque  $f'$  et de son gradient  $h$ , une procédure de hiérarchisation élimine la sur-segmentation de l'image.

Le gradient de l'image est formé de minces parois verticales dont la hauteur correspond à la valeur du gradient mosaïque. On effectue la LPE sur le graphe non planaire et valué de la figure 3.17(d). Cela revient à considérer que tout mur plus bas que ceux qui l'entourent peut être supprimé. Le graphe non planaire est composé de sommets (les représentants des arcs - murs  $C_{ij}$  de la LPE) et d'arêtes (les couples d'arcs  $(C_{ij}, C_{ik})$  et  $(C_{ji}, C_{jk})$ ). En itérant la LPE sur les images mosaïques successives, une pyramide hiérarchique est constituée.

Une des stratégies pour réduire la sur-segmentation consiste à seuiliser la hauteur de la LPE. Cette solution n'est cependant pas idéale car d'une part elle nécessite la recherche d'un seuil adapté et d'autre part il n'est pas certain que celui-ci existe. C'est la raison pour laquelle le critère qui autorise la fusion n'est pas un seuil mais simplement la condition que les valeurs de gradient des arcs intérieurs soient plus faibles que les arcs les entourant.

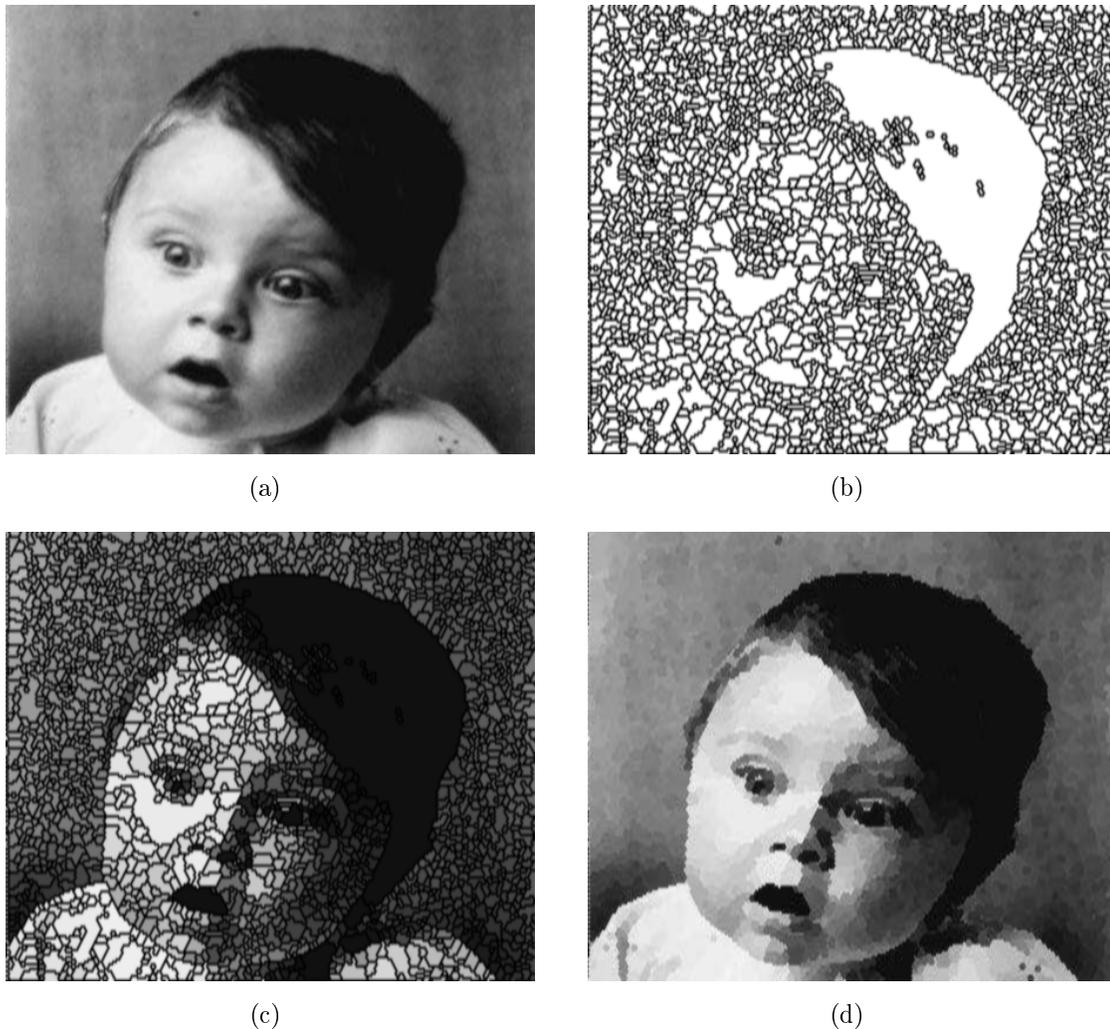


FIG. 3.16 – Exemple de construction d’une image mosaïque : (a) Image initiale, (b) LPE du gradient, (c) valuation des bassins versants et (d) image mosaïque (Images tirées de [Beucher, 1990]).

### Les cascades

Le concept de segmentation hiérarchique des cascades a été introduit par [Beucher, 1994]. Soit la fonction  $f$  de la figure 3.18(a) ; parmi ses différents minima, trois d’entre eux,  $m_1$ ,  $m_2$  et  $m_3$ , apparaissent intéressants du fait qu’ils marquent les régions les plus significatives de l’image. La notion de « cascades » apporte une solution à la caractérisation de ce type de minima ainsi qu’à la détermination automatique des bassins versants sans *a priori*. La figure 3.18(b) montre les directions vers lesquelles se déverse chaque bassin. Il est possible de considérer un marqueur significatif comme la frontière séparant deux bassins qui s’inondent symétriquement.

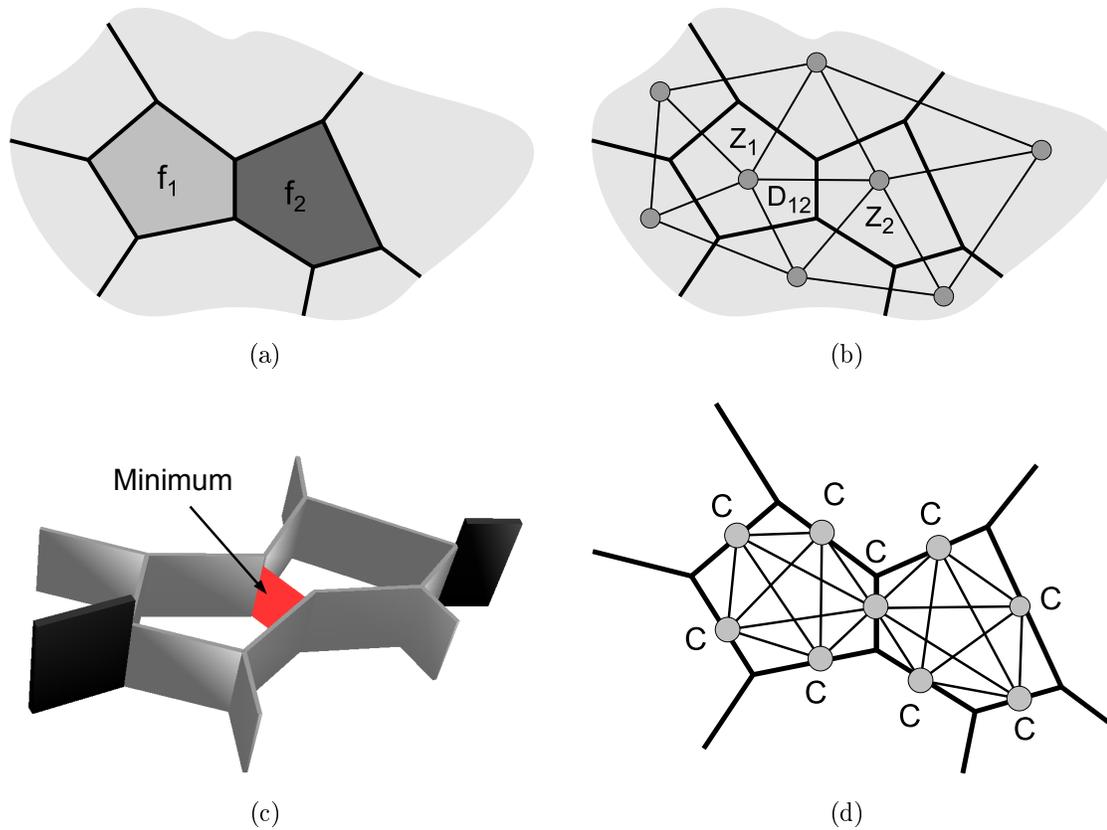
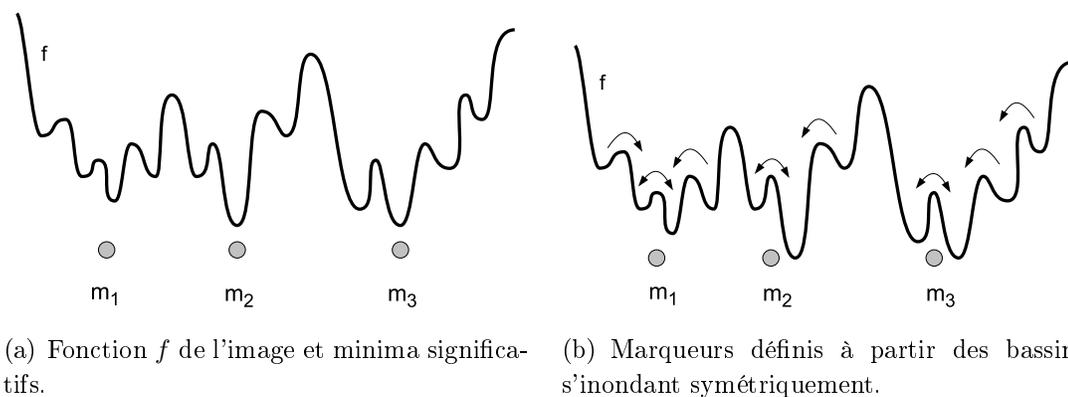


FIG. 3.17 – Exemple de graphe associé à une image mosaïque : (a) les bassins versants et leur minimum, (b) le graphe associé à l'image mosaïque, (c) la représentation 3D d'un gradient mosaïque et (d) le graphe associé aux arcs de la LPE primaire.



(a) Fonction  $f$  de l'image et minima significatifs.

(b) Marqueurs définis à partir des bassins s'inondant symétriquement.

FIG. 3.18 – Caractérisation de marqueurs significatifs.

Beucher a proposé un algorithme efficace de segmentation hiérarchique par les cascades basé sur la reconstruction de l'image. Soit deux fonctions  $f$  et  $g$  avec  $f \geq g$ . La reconstruction [Beucher, 1990] par l'érosion géodésique  $R^*(f, g)$  de  $f$  par  $g$  est définie par :

$$R^*(f, g) = E_f^\infty(g) = \lim_{n \rightarrow \infty} (E_f \circ \dots \circ E_f)(g) \quad (3.10)$$

où  $E_f(g) = \sup(g \ominus B, f)$ . Soit  $f$  la fonction positive et bornée ( $0 \leq f \leq m$ ) de l'image et  $W(f)$  la fonction LPE correspondant à l'ensemble des LPE de  $f$ . Une nouvelle fonction  $g$  se définit à partir de  $W(f)$  :

$$g(x) = \begin{cases} f(x) & \text{ssi } x \in W(f) \\ m & \text{ssi } x \in W^c(f) \end{cases} \quad (3.11)$$

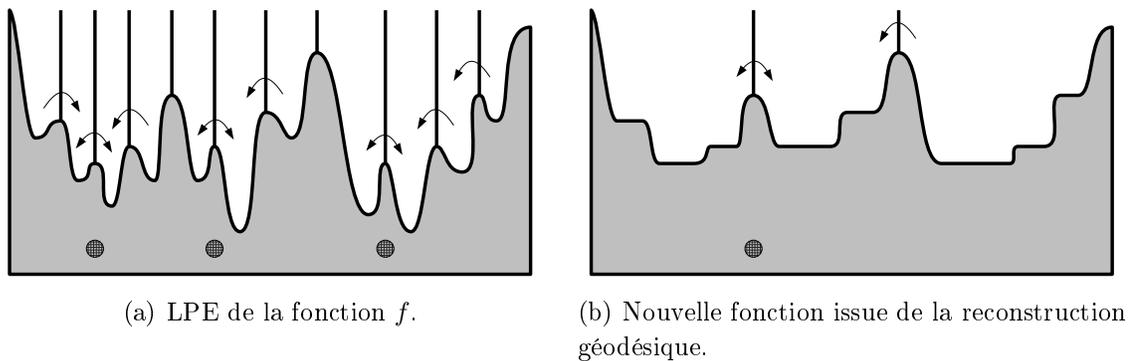


FIG. 3.19 – Reconstruction géodésique pour la détection de marqueurs.

La fonction  $g$  est supérieure à  $f$ , il est donc possible de reconstruire  $f$  à partir de  $g$  en effectuant une reconstruction géodésique de  $g$  sur  $f$  par érosion. Cette reconstruction a pour effet de supprimer tous les minima non significatifs de  $f$  qui sont à l'origine de la sur-segmentation. Les minima de la nouvelle fonction sont devenus des marqueurs significatifs de la fonction d'origine  $f$ . Les figures 3.18(a) et 3.19(a) montrent un exemple de fonction  $f$  ; la figure 3.19(b) correspond à la nouvelle fonction obtenue par reconstruction géodésique. En appliquant la LPE sur cette nouvelle image, seules les crêtes les plus significatives sont détectées. Les deux fonctions des figures 3.19(a) et 3.19(b) font apparaître des marqueurs pour la LPE de la prochaine itération.

### Les cascades basées sur les graphes

[Marcotegui et Beucher, 2005] ont proposé une implémentation des cascades basée sur les graphes. La méthode, qui utilise l'arbre de poids minimum, permet un accès rapide aux différents niveaux de la hiérarchie. Le résultat de la LPE est considéré comme la partition d'entrée (figure 3.20(a)). Un procédé d'inondation est utilisé pour fusionner successivement les régions et construire parallèlement l'arbre de poids minimum (figure 3.20(b)). Ce graphe est initialisé avec un nœud correspondant à chaque minimum et sans aucun arc. Un bassin est associé à un minimum ainsi qu'à un nœud. Durant l'inondation,

chaque fois que deux régions de bassins différents se rencontrent, un arc est ajouté au graphe pour relier ces deux régions qui fusionnent. La valeur de l'arc correspond à la hauteur à laquelle ces régions se sont rencontrées. A la fin de l'inondation, le graphe est devenu l'arbre de poids minimum car un arc est ajouté seulement si deux régions différentes se rencontrent et l'inondation suit le chemin de hauteur minimum.

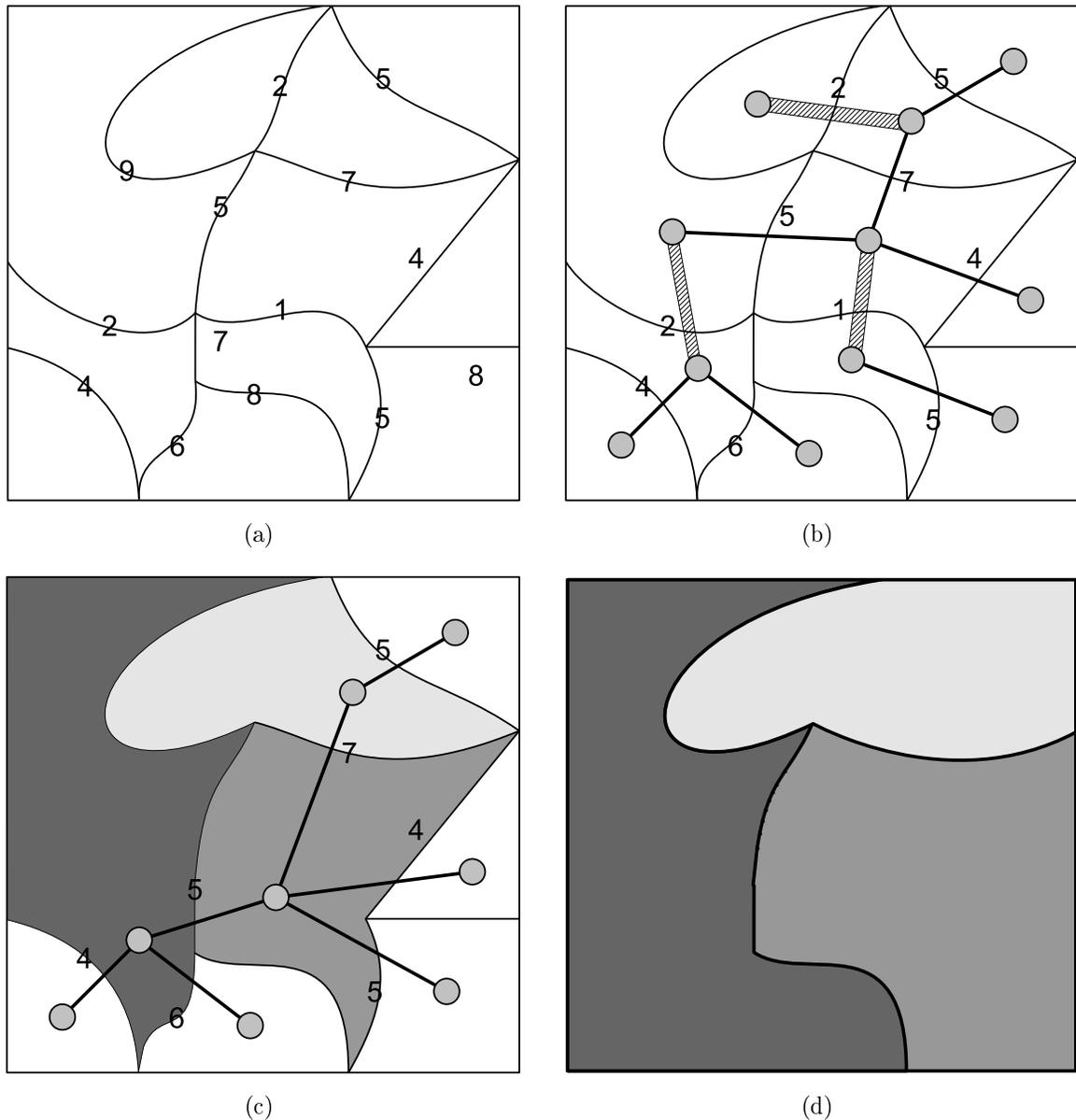


FIG. 3.20 – Segmentation hiérarchique à partir des cascades basées sur les graphes : (a) Partition avec les LPE évaluées à partir de la hauteur des points selles (b) arbre de poids minimum créé lors de l'inondation de la partition, (c) labellisation des régions à partir du label de arcs minima et (d) propagation des labels.

Un arc minimum local de l'arbre de poids minimum peut se définir comme un arc ayant des arcs voisins de valuation supérieure. Chaque arc minimum obtient un label différent. Les régions associées à un arc labellisé obtiennent automatiquement le label de cet arc (figure 3.20(c)). La partition finale s'obtient en propageant les labels à partir des arcs de l'arbre de poids minimum dans l'ordre croissant de leur valuation (figure 3.20(d)). Il est possible de réaliser plusieurs itérations des cascades en considérant les nouvelles partitions obtenues après chaque itération.

La segmentation d'images complexes à partir des cascades et de gradients améliorés a été abordée dans [Hanbury et Marcotegui, 2006]. Deux types de fonctions de distance sont utilisés, la fonction de distance classique (figure 3.14) et la fonction de distance pour les images numériques récemment introduite par [Beucher, 2007]. Cette méthode offre des résultats comparables à la coupe normalisée [Shi et Malik, 2000] qui tend à gagner la même notoriété que la LPE comme outil de segmentation.

### 3.3.3 La LPE contrainte par les dynamiques des minima

La LPE contrainte par les dynamiques des minima a été proposée par [Grimaud, 1992]. Le principe correspond à la suppression des minima régionaux selon un critère de contraste appelé *dynamique*. La dynamique d'un bassin généré par la LPE est la hauteur qu'il est nécessaire de monter pour atteindre un bassin dont le minimum est plus faible que le bassin de départ. La dynamique d'un chemin  $P(x, y)$  reliant deux points  $x$  et  $y$  correspond à la différence entre les altitudes minimum et maximum par lesquelles il est nécessaire de passer pour atteindre les deux points. La figure 3.21 représente la

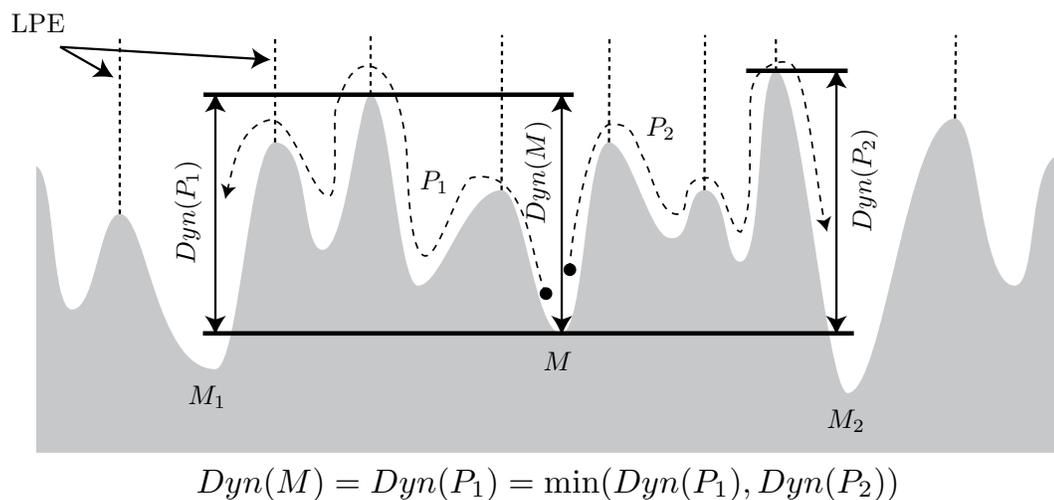


FIG. 3.21 – Dynamique du minimum  $M$  (image inspirée de [Grimaud, 1992]).

détermination de la dynamique du minimum  $M$ . Il existe deux chemins  $P_1$  et  $P_2$  pour atteindre respectivement les bassins associés aux minima  $M_1$  et  $M_2$  dont l'altitude est inférieure à  $M$ . La dynamique du minimum  $M$  correspond à la dynamique la plus faible des deux chemins.

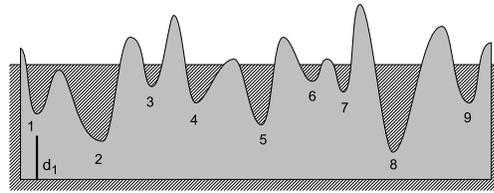
La figure 3.22 illustre la construction des dynamiques des minima à partir de l'inondation des bassins. Lorsque deux bassins se rencontrent, le bassin associé au minimum d'altitude la plus élevée obtient la dynamique correspondant à la différence entre la hauteur du point selle et la valeur de son minimum. Ce bassin est ensuite fusionné avec le bassin associé au minimum d'altitude la plus faible. Les bassins 1 et 2 sont les premiers à se rencontrer. Le bassin 1 ayant un minimum plus élevé que le bassin 2 obtient la dynamique  $d_1$ . Le bassin 1 est ensuite fusionné avec 2. L'eau continue ensuite de monter jusqu'à ce que de nouveaux bassins se rencontrent. L'étape présentée à la figure 3.22(b) permet le calcul des dynamiques des minima 4 et 6, ainsi que la fusion du bassin 4 avec 5 et la fusion du bassin 6 avec 7. La dernière étape (figure 3.22(f)) correspond à la création de la dynamique du bassin 2. Le minimum 8 possède une dynamique infinie car il a la plus faible altitude.

Le seuillage peut être effectué en considérant les bassins dont la dynamique est supérieure à un seuil comme marqueurs et en réalisant une nouvelle itération de la LPE. Différentes stratégies de suppression des bassins en fonction de leur dynamique sont abordées dans [Fjørtoft, 1999].

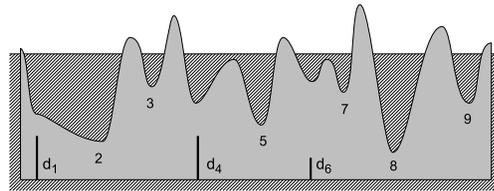
Le seuillage simple de la LPE consiste à ne pas établir de frontière entre deux régions si l'altitude absolue du point selle est inférieure à un seuil. Le seuillage des dynamiques de bassin utilise des informations beaucoup moins locales que la hauteur du point selle ; les régions créées sont plus significatives.

### Les dynamiques de contour

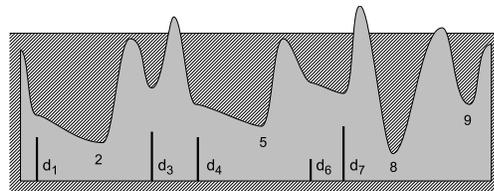
Le concept de dynamique de contour, introduit par [Najman et Schmitt, 1996], permet de créer une représentation hiérarchique et compacte des segmentations obtenues en appliquant différents seuils aux dynamiques de bassin. La dynamique d'un arc peut se définir comme la valeur maximale du seuil pour lequel cet arc subsiste lorsque tous les bassins ayant une dynamique inférieure au seuil sont fusionnés. Pour calculer les dynamiques de contour, [Najman et Schmitt, 1996] ont proposé d'utiliser la liste de remplissage qui est construite lors de l'évaluation des dynamiques de bassin avec l'algorithme de [Grimaud, 1992]. [Lemaréchal *et al.*, 1998] ont démontré que l'algorithme de [Najman et Schmitt, 1996] n'offre pas toujours des résultats corrects. [Schmitt, 1998] a par la suite apporté une correction au problème.



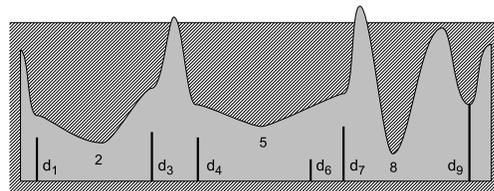
(a)  $Dyn(1)$ .



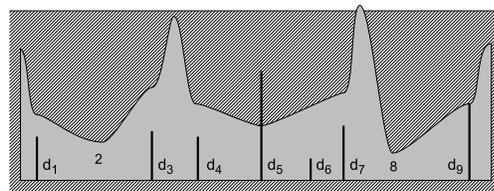
(b)  $Dyn(4)$ ;  $Dyn(6)$ .



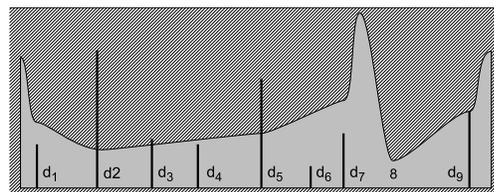
(c)  $Dyn(3)$ ;  $Dyn(7)$ .



(d)  $Dyn(9)$ .



(e)  $Dyn(5)$ .



(f)  $Dyn(2)$ ;  $Dyn(8) = \infty$ .

FIG. 3.22 – Calcul de la dynamique des minima.

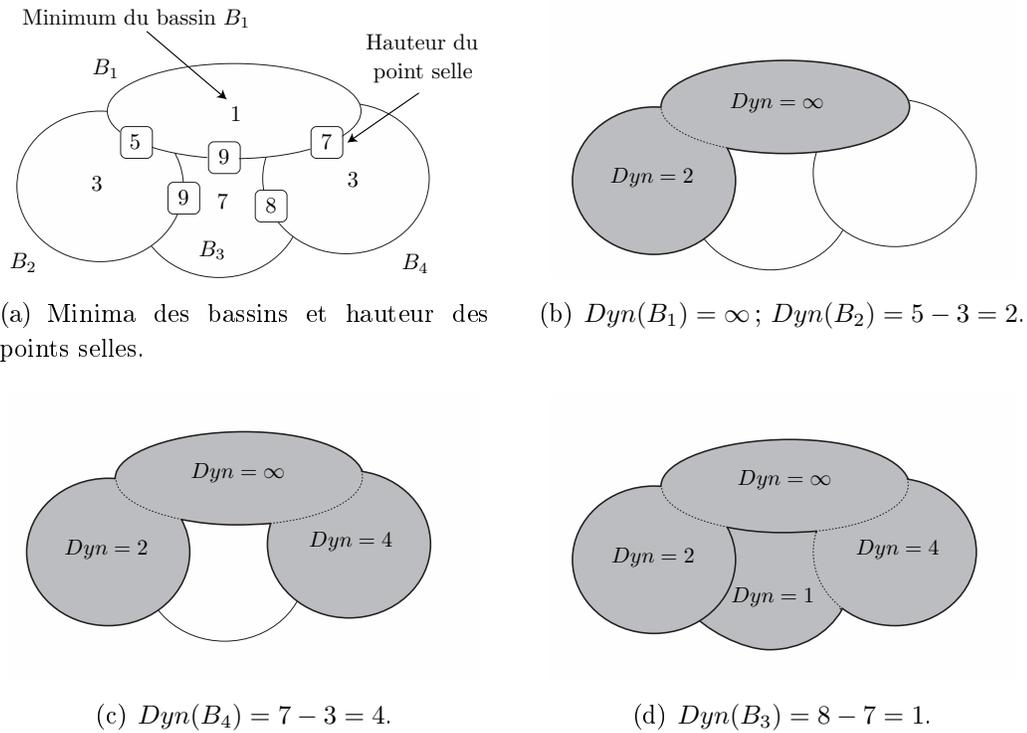


FIG. 3.23 – Calcul des dynamiques des minima à partir du procédé d'inondation (Exemple tiré de [Lemaréchal *et al.*, 1998]).

Pour calculer les dynamiques de contour, [Lemaréchal *et al.*, 1998] proposent de calculer les dynamiques des minima puis d'évaluer les contours qui sont intervenus dans ces calculs. La figure 3.23 retranscrit un exemple de calcul de la dynamique des minima. La frontière séparant  $B_3$  et  $B_4$  résiste jusqu'à un seuil de 1 ; celle séparant  $B_1$  et  $B_2$  résiste jusqu'à un seuil de 2. Un seuil supérieur à 4 entraîne la fusion de tous les bassins. Les étapes de création des dynamiques de contour apparaissent à la figure 3.24. Lemaréchal *et al.* ont proposé une méthode pour calculer les dynamiques de contours à partir du procédé d'inondation de [Grimaud, 1992] :

1. La construction d'un graphe où chaque bassin obtient un nœud dont la valeur correspond à son minimum. Un arc reliant deux nœuds correspond à la frontière de deux bassins adjacents ; sa valeur correspond à la dynamique de contour.
2. L'évaluation des dynamiques de contour en utilisant le procédé d'inondation de Grimaud : à chaque fois qu'une dynamique de bassin est calculée, le point selle impliqué dans le calcul de cette dynamique obtient la valeur de la dynamique (figure 3.24(b)).
3. La fusion des bassins connectés par une dynamique  $i$  dans l'ordre croissant des dynamiques.
4. L'évaluation des arcs non évalués. Ces arcs appartiennent à un groupe fusionné

et obtiennent la dynamique de l'arc qui est à l'origine de la création du groupe (figure 3.24(e)).

La dynamique de contour est un outil puissant qui autorise des traitements comme la suppression des contours dont la dynamique est inférieure à un seuil. Il offre une caractérisation des frontières moins locale que la hauteur des points selles des LPE et permet une segmentation plus significative.

De récentes études ont été menées sur les dynamiques, notamment [Lotufo et da Silva, 2002], [Najman et Couprie, 2003], [Brun *et al.*, 2005] et [Bertrand, 2007].

La LPE ainsi que certaines stratégies pour éviter la sur-segmentation ont été adaptées aux maillages polygonaux. La section suivante aborde la segmentation de maillages polygonaux à partir de la LPE et nous verrons à la section 5 les outils que nous avons utilisés pour approcher une segmentation convenable.

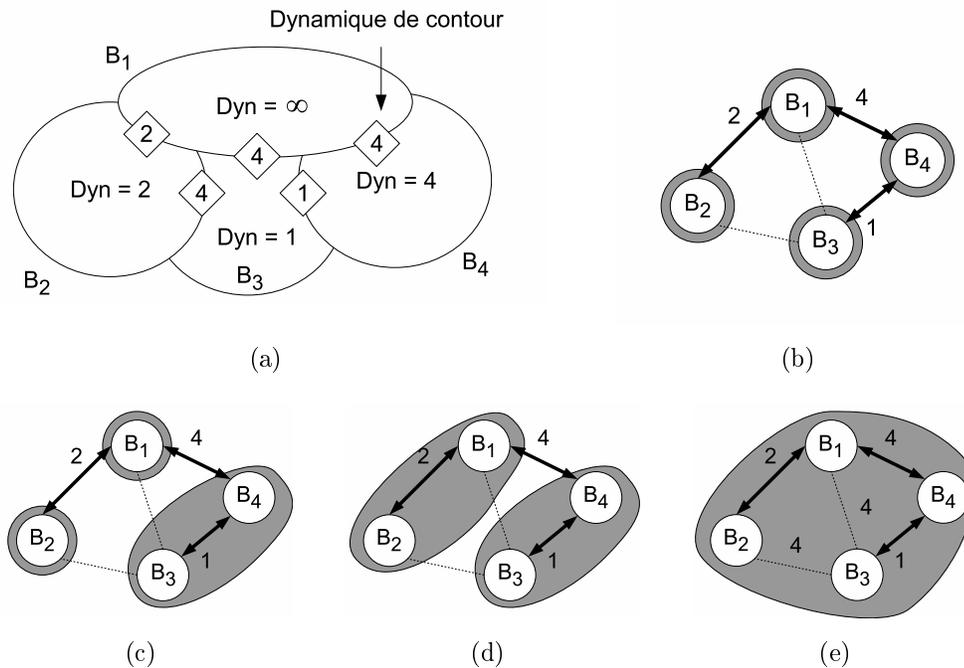


FIG. 3.24 – Calcul des dynamiques de contour. (a) Dynamiques de contour théoriques. (b-e) Les étapes de création des dynamiques de contour.

### 3.4 La LPE sur les maillages polygonaux

La LPE peut être utilisée pour réaliser la segmentation de différents types de structures, notamment les images 2D pour lesquelles de nombreuses approches [Roerdink et Meijster, 2001] ont été développées. La LPE est également présente en segmentation d'image 3D [Grau *et al.*, 2004] [Cates *et al.*, 2005], d'images de profondeur [Gee et Abidi, 1995], de vidéos [Gatica-Perez *et al.*, 2001] et de maillages polygonaux.

#### L'approche « descendante » de la LPE

Les travaux de [Mangan et Whitaker, 1999] furent les premiers à offrir une réelle stratégie de segmentation de maillages polygonaux à partir de la LPE. La LPE peut être utilisée sur une structure d'éléments connectés (figure 3.25) avec une fonction de hauteur. Dans le cas des maillages polygonaux, la structure correspond à des vertex connectés entre eux ; la courbure des vertex est généralement utilisée comme fonction de hauteur. L'algorithme 6 fait apparaître les principales étapes du procédé de segmentation par LPE. La méthode utilisée correspond à l'approche « descendante » de la LPE. Cette méthode, qui a l'avantage d'être simple, ne permet pas de gérer correctement les plateaux et se contente de les associer à la première région trouvée. L'algorithme nécessite également le stockage des vertex du chemin pour, une fois un label trouvé, labelliser ces vertex avec le label. Nous allons voir par la suite qu'il existe des algorithmes plus performants et précis. Pour corriger la sur-segmentation, les auteurs ont utilisé la fusion selon le critère de « profondeur de la LPE ». Nous abordons à la section 5.1 différentes stratégies pour fusionner les régions.

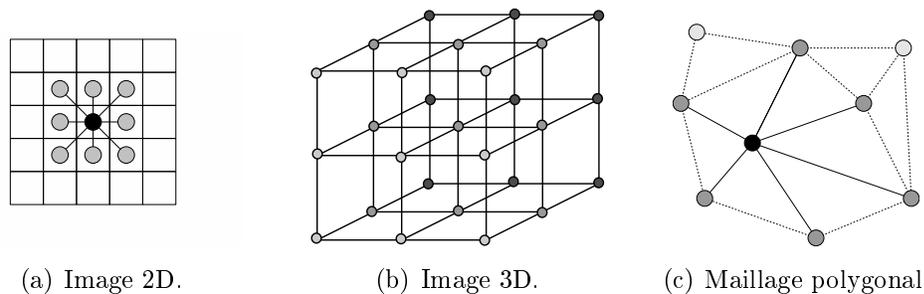


FIG. 3.25 – Exemple de relations de voisinage sur différents types de structures.

---

**Algorithme 6** : LPE de [Mangan et Whitaker, 1999]

---

**début**

- Calculer la courbure (ou une autre fonction de hauteur) pour chaque vertex
- Déterminer tous les plateaux et les classer comme plateau minimum (avec un label) ou plateau non minimum

- Trouver les minima locaux et leur attribuer à chacun un label différent

**pour chaque plateau faire**

- Déterminer le chemin qui descend jusqu'à une région labellisée
  - Labelliser le plateau et les vertex du chemin avec le label trouvé

**pour chaque vertex  $v$  non labellisé faire**

- Déterminer le chemin qui descend jusqu'à une région labellisée
  - Labelliser le vertex  $v$  et les vertex du chemin avec le label trouvé

- Fusionner les régions dont le critère « profondeur de la LPE » est inférieur à un seuil

**fin**

---

La fonction de hauteur correspond ici à la courbure calculée par la norme de la matrice de covariance. Les détails relatifs à son implémentation sont proposés au chapitre suivant. La profondeur de la LPE correspond à la différence entre la hauteur du point selle de la LPE et le minimum du bassin adjacent. Par rapport à la hauteur des points selles, ce critère offre une meilleure caractérisation de la hauteur d'une frontière en tenant compte des bassins adjacents.

La profondeur de la LPE peut se définir par :

$$P_{LPE} = h - \max(\min(A), \min(B)) \quad (3.12)$$

avec  $h$  la courbure minimum des vertex composant la LPE, et  $A$  et  $B$ , les régions adjacentes à la LPE (voir figure 2.12).

L'algorithme 7 propose une implémentation rapide de la fusion des régions à partir d'un seuil donné. Si le nombre de régions n'est pas trop élevé, il est possible de stocker tous les niveaux de fusion et ainsi de les parcourir pour trouver rapidement le niveau le plus adapté à l'application. L'idéal est de stocker les informations dans un arbre à partir duquel un processus rapide de labellisation peut être exécuté une fois le niveau choisi. Le nombre de régions demeure cependant assez important et la recherche du meilleur niveau de segmentation est largement perfectible. Nous verrons à la section 5.1 une méthode de fusion beaucoup plus efficace basée sur les cascades.

**Algorithme 7** : Fusion des régions à partir de la profondeur de la LPE**début**Initialiser une liste triée  $L$  selon la profondeur de la LPE contenant les LPE séparant deux régionsDéterminer la courbure minimum  $h$  de chaque LPEInitialiser la profondeur  $P_{LPE}$  de chaque LPE à  $\infty$ Initialiser une liste  $R$  contenant les régionsTrouver les courbures minimum  $min_r$  de chaque région  $r$ **pour chaque**  $r \in R$  **faire**    **pour chaque** LPE adjacente à  $r$  **faire**        **si**  $P_{LPE} > h - \min(r)$  **alors**             $P_{LPE} \leftarrow h - \min(r)$             Mettre la LPE à sa place dans  $L$  en fonction de  $P_{LPE}$ /\* Les LPE ont été triées en fonction de  $P_{LPE}$  et  $L \neq \emptyset$  \*/Extraire la première LPE de  $L$ **tant que**  $L \neq \emptyset$  et  $P_{LPE} < \text{seuil}$  **faire**    Extraire les régions  $A$  et  $B$  adjacentes à la LPE,  $A$  étant la région dont la courbure minimum est la plus forte

Supprimer les LPE internes aux deux régions

    Fusionner  $A$  avec  $B$ 

Mettre à jour la nouvelle région ainsi que la profondeur des LPE voisines

    Extraire la prochaine LPE de  $L$ **fin****La LPE par ascension de colline**

Une segmentation de maillages polygonaux à partir de l'algorithme de LPE par ascension de colline a été proposée par [Page *et al.*, 2003b]. La méthode est inspirée de l'algorithme de progression rapide [Kimmel et Sethian, 1998] qui calcule sur un maillage le plus court chemin géodésique d'un vertex à un autre. Le principe repose sur l'utilisation d'une liste triée pour contrôler la progression géodésique sur le maillage. Un principe similaire est utilisé dans [Page *et al.*, 2003b] pour contrôler l'inondation sur le maillage. La liste ne fait cependant pas intervenir le cumul des distances géodésiques mais utilise un critère de hauteur basé sur les courbures et la loi des minima. La méthode de segmentation de Page *et al.* nécessite l'estimation puis le seuillage des courbures afin d'obtenir une structure qui se prête mieux aux opérations morphologiques d'ouverture et de fermeture. Ces deux opérateurs permettent l'obtention de marqueurs pour la LPE. L'algorithme 8 résume les principales étapes du procédé d'inondation de la LPE.

**Algorithme 8** : LPE par « ascension de colline »**début**Initialiser une liste triée  $L$  contenant les vertex minima ou marqueurs rangés selon leur hauteur**tant que**  $L \neq \emptyset$  **faire**    Extraire le premier vertex  $v$  de  $L$     **pour chaque** *vertex voisin*  $q$  **de**  $v$  **faire**        **si**  $q$  *n'est pas labellisé* **alors**            Labelliser  $q$  à partir du label de  $v$             Insérer  $q$  dans  $L$  à la place correspondant à sa hauteur

Créer les LPE entre les régions connexes (si besoin)

**fin**

Pour traiter des cas plus généraux que ceux proposés par Page et al., nous avons implémenté l'algorithme 8 en utilisant une fonction de hauteur basée sur la courbure uniquement et non plus la loi des minima, plutôt spécifique à la segmentation en parties significatives. Les modèles de la figure 3.26 ont été segmentés suivant l'algorithme 8 à partir des minima, avec une fonction de hauteur relative à la courbure des vertex et sans procédé de fusion. Il apparaît une sévère sur-segmentation. Nous proposons dans les chapitres suivants des solutions pour corriger ce problème. Nous abordons trois principaux facteurs sur lesquels il est possible d'intervenir : la fonction de hauteur, la détermination de marqueurs et la fusion des régions.

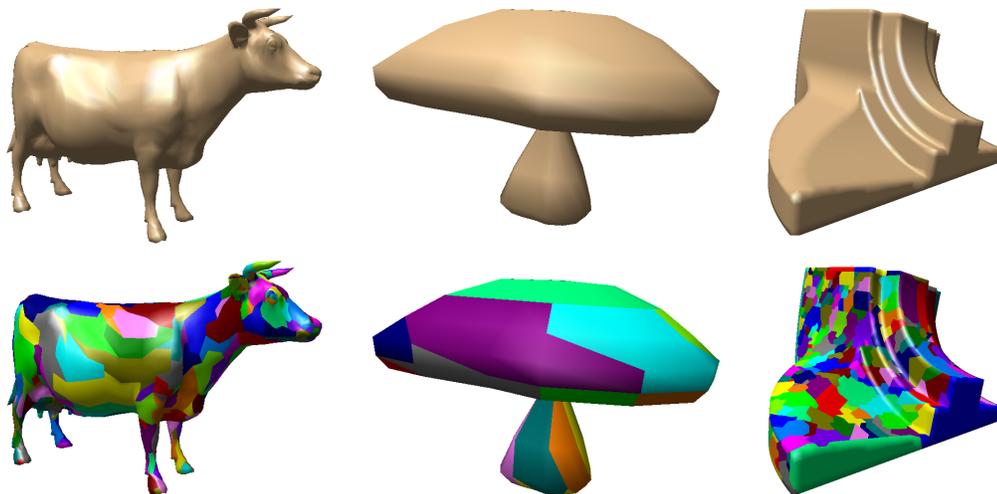


FIG. 3.26 – Modèles 3D segmentés à partir de la LPE. La première ligne représente les modèles d'origine. La seconde ligne fait apparaître la segmentation par LPE selon l'algorithme 8 avec une fonction de hauteur relative à la courbure des vertex.

### La LPE par files d'attentes hiérarchiques (FAH)

La LPE par FAH représente une solution adaptée pour gérer une structure composée de régions séparées explicitement par des LPE. En effet, les méthodes précédentes ne localisent pas directement les LPE, et ce n'est qu'une fois le procédé de segmentation terminé que les LPE sont positionnées. Les méthodes basées sur la fusion de régions nécessitent une localisation précise des LPE, c'est la raison pour laquelle la LPE par FAH sera privilégiée dans ce cas.

L'algorithme 9 fait intervenir plusieurs files d'attentes ; chacune d'elles est associée à un niveau de hauteur. Dans le cas des images en niveaux de gris, une file d'attente peut être associée à un niveau de gris ; dans le cas des maillages, une file d'attente peut être associée à une hauteur de courbure de vertex.

---

#### Algorithme 9 : La LPE 3D par FAH

---

**début**

```

   $n \leftarrow$  le nombre de hauteurs (courbures) différentes
  Initialiser une liste triée  $L$  contenant  $n$  hauteurs et donner à chacune d'elles
  un numéro selon leur rang
  Ces numéros deviennent les nouvelles hauteurs  $h$  des vertex
  /* La hauteur est maintenant associée à un numéro de file
     d'attente */
  Initialiser une liste  $Q$  contenant  $n$  files d'attentes
  Déterminer les minima / marqueurs et leur associer un label différent
  Ranger les minima / marqueurs dans les files d'attentes correspondant à leur
  hauteur
  pour  $i \leftarrow 0$  à  $n$  faire
     $file\_courante \leftarrow Q[i]$ 
    tant que  $file\_courante \neq \emptyset$  faire
      Extraire le vertex  $v$  de la file d'attente
      pour chaque vertex voisin  $q$  de  $v$  faire
        si  $q$  n'est pas étiqueté alors
          Étiqueter  $q$  à partir du label de  $v$ 
          si  $h(q) < i$  alors  $h(q) \leftarrow i$ 
          Insérer  $q$  dans la file d'attente correspondant à sa hauteur  $h(q)$ 
        sinon si label de  $q \neq$  label de  $v$  alors
          Définir  $q$  comme LPE

```

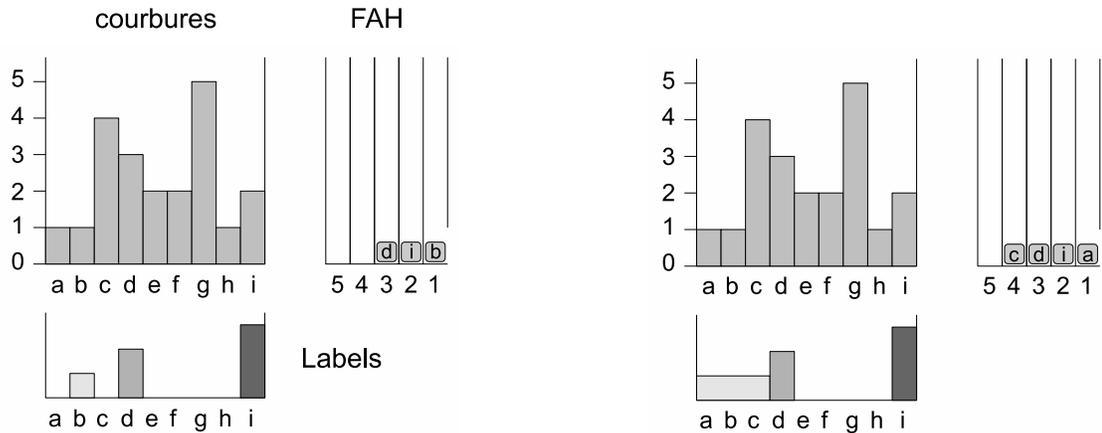
**fin**

---

La figure 3.27 propose plusieurs itérations de la LPE par FAH. A l'étape (a), les marqueurs  $b$ ,  $d$  et  $i$  sont ajoutés dans la file d'attente correspondant à leur hauteur. Ils sont tous associés à un label différent. A l'étape (b), le vertex  $b$  est retiré et donne son label à ses voisins  $a$  et  $c$  qui sont ajoutés dans les files d'attentes. A l'étape (c), le vertex  $a$  est retiré puis la file 1 disparaît car elle ne possède plus d'élément. Toujours à cette étape, le vertex  $i$  est ensuite retiré et son voisin  $h$  est ajouté dans une file d'attente. Il est à remarquer que sa hauteur vaut 1 et qu'elle est plus faible que l'indice de la file de plus forte priorité, à savoir la file 2. Ce phénomène arrive dans le cas de la LPE avec marqueurs, comme on peut le voir à la figure 3.12. Il suffit tout simplement de considérer la hauteur de  $h$  comme équivalente à l'indice de la file d'attente courante. L'algorithme génère en fait une modification du relief en même temps que le procédé d'inondation. A l'étape (d), le vertex  $h$  est retiré et son voisin  $g$  est ajouté. A l'étape (e), le vertex  $d$  est retiré puis son voisin  $e$  est ajouté. Son autre voisin  $c$ , déjà étiqueté, devient LPE. A l'étape (f), le vertex  $e$  est retiré puis son voisin  $f$  est ajouté. Il est ensuite retiré et son voisin  $g$ , déjà étiqueté, devient LPE.

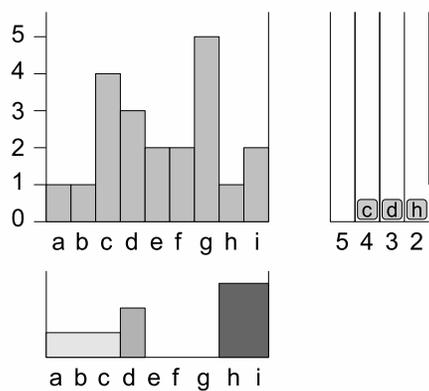
La LPE réalisée à l'aide de cet algorithme est biaisée. Serge Beucher y consacre une étude dans [Beucher, 2004]. Le biais est lié à l'ordre de traitement des éléments dans les files d'attentes hiérarchiques. La conséquence du biais correspond à un placement inexact des LPE. Pour corriger le problème, il est indispensable de séparer les différentes générations d'inondation. La solution retenue utilise une file d'attente intermédiaire et un label spécifique indiquant la génération. Bien que le phénomène du biais soit beaucoup moins flagrant sur les maillages polygonaux, notamment en raison d'un très faible nombre de plateaux, nous avons utilisé l'algorithme 9 de la LPE par FAH et intégré les modifications proposées par Beucher pour obtenir une LPE sans biais.

Nous avons pu voir au travers de ce chapitre les principaux concepts de la LPE ainsi que les différentes méthodes pour la calculer et les outils permettant de réduire la sur-segmentation. Bien que nos travaux concernent la segmentation de maillages polygonaux, la segmentation par LPE, au sens plus général, a été abordée. C'est pourquoi de nombreuses références aux travaux effectués sur les images 2D prennent place. La dernière méthode qui a été présentée correspond à la LPE par FAH sans biais et représente une base à partir de laquelle nous avons effectué nos recherches. Dans le prochain chapitre, nous abordons le choix de la fonction de hauteur de la LPE. Nous verrons dans les chapitres suivants les solutions que nous avons proposées pour éviter ou corriger la sur-segmentation.

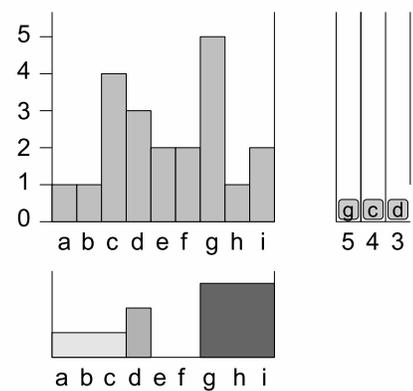


(a) Les vertex  $b, d$  et  $i$  sont des marqueurs ayant des labels différents.

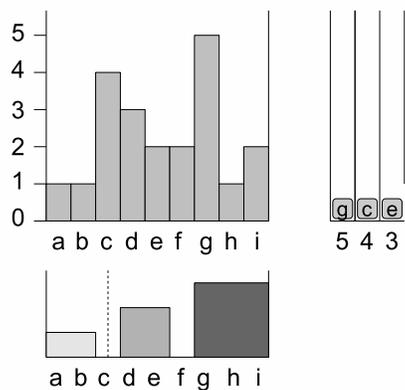
(b) Extraction du vertex  $b$  et ajout de ses voisins  $a$  et  $c$  dans les files d'attente.



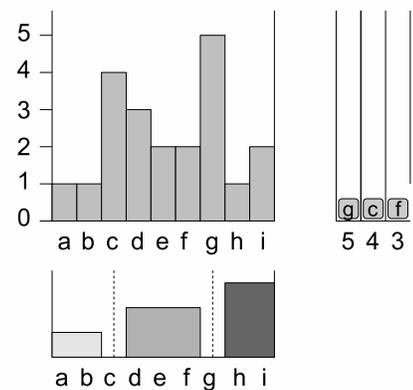
(c) Extraction de  $a$  puis extraction de  $i$  dont le voisin  $h$  est ajouté.



(d) Extraction de  $h$  puis ajout de  $g$ .



(e) Extraction de  $d$  puis ajout de  $e$ . Le vertex  $c$  devient LPE.



(f) Le fait que  $f$  ait un voisin  $g$  de label différent implique que  $g$  devient LPE.

FIG. 3.27 – Illustration de la construction de la LPE par FAH avec marqueurs. Les vertex  $a, b, \dots, i$  ont ici une courbure comprise entre 0 et 5.



# Chapitre 4

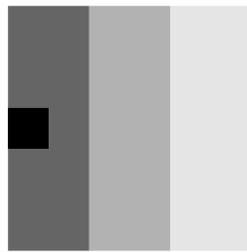
## La fonction de hauteur

Le choix de la fonction de hauteur est essentiel pour le procédé de LPE. Il correspond au relief sur lequel est réalisée l'inondation. La courbure correspond à la fonction de hauteur la plus utilisée sur les maillages. La norme de la matrice de covariance est une méthode de calcul de la courbure des vertex largement répandue. Nous avons proposé une nouvelle fonction de hauteur qui caractérise la courbure d'une face à partir de la norme de la matrice de covariance. La LPE utilisant cette fonction de hauteur n'évolue plus sur une structure de vertex connectés, mais sur une structure de faces connectées. Ce type de courbure permet une meilleure segmentation comme nous pourrions le voir au chapitre 6. Nous avons également défini une nouvelle fonction de hauteur relative à la distance aux lignes de crêtes. Ces lignes soulignent l'existence de zones continues de type concave ou convexe sur le maillage. Cette fonction de distance utilisée avec la LPE permet de fermer les contours représentés par les lignes de crêtes. Ce chapitre offre un aperçu des principales fonctions de hauteur utilisées en segmentation par LPE. La section suivante correspond à l'étude des fonctions de hauteur spécifiques aux images 2D, les autres sections abordent les fonctions de hauteur liées aux maillages polygonaux.

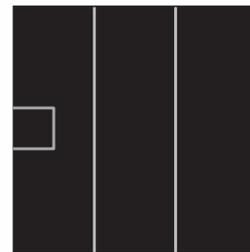
### 4.1 La notion de « hauteur » sur les image 2D

Les fonctions de hauteur généralement utilisées pour les images 2D correspondent aux niveaux de gris et au gradient de l'image. Dans la plupart des cas, cette dernière fonction apparaît plus pertinente, comme on peut le voir à la figure 4.1. En effet, le gradient permettra la création de LPE aux endroits où de fortes variations de couleur apparaissent, caractérisant la présence de contours et de frontières. La distance au fond de l'image ou

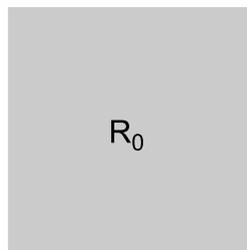
aux contours est une autre fonction de hauteur assez répandue. Elle fait généralement intervenir une image binaire où chaque pixel supposé à l'intérieur de l'objet est associé à sa distance au bord de l'objet le plus proche. Nous avons pu voir une application de cette fonction sur la figure 3.14 où le but était de séparer des grains de café. Dans le cadre d'une segmentation orientée partitionnement, il est possible de généraliser cette fonction à tous les pixels de l'image et non plus à ceux situés à l'intérieur de l'objet potentiel. Nous avons utilisé ce concept à la section 4.3 sur les maillages polygonaux en considérant l'inverse de la distance aux contours comme fonction de hauteur.



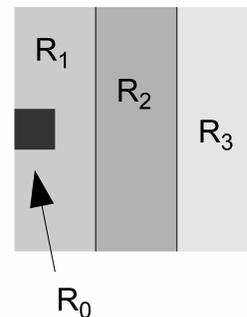
(a) Image en niveaux de gris.



(b) Gradient de l'image.



(c) Segmentation par LPE à partir de l'image en niveaux de gris.



(d) Segmentation par LPE à partir du gradient de l'image.

FIG. 4.1 – Comparaison des fonctions de hauteur « Niveaux de Gris » et « Gradient ».

Dans [Hanbury et Marcotegui, 2006] est proposée une fonction de hauteur pour la LPE calculée à partir de la distance à un contour. Les contours, issus de la méthode de [Martin *et al.*, 2004], ont la particularité de dépendre de la luminosité, de la couleur et du gradient de texture. Ces informations sont combinées pour calculer une probabilité de frontière où les poids de chaque gradient sont obtenus par apprentissage supervisé par rapport à une segmentation réalisée par un expert. Hanbury et Marcotegui ont déterminé expérimentalement le seuil  $t = 0.07$  pour obtenir une image binaire à partir de l'image des probabilités de frontières. Pour éviter la recherche d'un seuil, les auteurs proposent de s'orienter vers l'utilisation des quasi-distances [Beucher, 2007].

[Lezoray et Cardot, 2003] ont proposé une fonction de hauteur spécifique aux images couleurs. Elle fait intervenir  $\overline{I(R)}$ , le vecteur de couleur moyenne de la région  $R$  de l'image  $I$ ,  $I(p)$ , le vecteur donnant la couleur du pixel  $p$  et  $\nabla(p)$ , le gradient. La fonction de hauteur se définit par :

$$f(p, R) = (1 - \alpha) \left\| \overline{I(R)} - I(p) \right\| + \alpha \|\nabla(p)\| \quad (4.1)$$

Cette fonction combine une information locale (le module du gradient) et une information plus globale (une comparaison statistique entre la couleur du pixel  $p$  et la région voisine  $R$ ).  $\alpha$  correspond à un poids donnant une priorité plus importante à l'une des deux informations. Le choix de ce coefficient est étudié dans [Lezoray et Cardot, 2002].

La segmentation d'image par LPE peut faire intervenir des outils de classification. [Géraud *et al.*, 2001] utilisent un histogramme 3D des couleurs à partir duquel certaines opérations de filtrage sont réalisées pour préparer la LPE de l'histogramme 3D. [Bicego *et al.*, 2003] ont repris plus tard le concept pour aborder les problèmes généraux de classification à l'aide de la LPE avec une fonction de hauteur liée à la densité d'éléments du voisinage.

Il existe plusieurs fonctions de hauteur associées à la LPE sur les maillages polygonaux. La courbure est l'une des plus populaires. Elle se révèle un bon indicateur pour positionner les frontières dans des zones de fortes courbures. La distance aux lignes de crêtes correspond à une fonction de hauteur très intéressante. Elle nécessite un procédé d'extraction des lignes de crêtes les plus significatives. Ces lignes peuvent être considérées comme des contours que la LPE pourra alors fermer pour former des régions. Nous proposons dans les sections suivantes une étude des différentes fonctions de hauteur rencontrées dans le cadre de la segmentation de maillages polygonaux par LPE.

## 4.2 Les méthodes de calcul de courbure

La qualité des résultats de la segmentation par LPE dépend de la précision et de la stabilité de la fonction de hauteur utilisée. La courbure reflète les propriétés locales de la surface. Les méthodes de calcul de courbure discrète offrent des résultats précis mais sont généralement confrontées à des problèmes tels que la distribution irrégulière des vertex du maillage et le bruit de la surface. Nous discutons, dans ce qui suit, de la notion de courbure et des différentes méthodes pour la calculer.

Soit  $S$  une surface dans  $\mathbb{R}^3$ . Pour chaque point de la surface  $S$ , il est possible d'approximer localement la surface par son plan tangent  $P$ , orthogonal au vecteur normal

$\mathbf{n}$ . La déformation locale de la surface se mesure par la courbure. Pour chaque unité de direction  $\mathbf{e}_\theta$  dans le plan tangent, la courbure normale  $K^N(\theta)$  est définie comme la courbure de la courbe qui appartient à la fois à la surface et au plan  $P_\theta$  formé par  $\mathbf{n}$  et  $\mathbf{e}_\theta$ . La figure 4.2 représente deux lignes de courbure créées à partir de l'intersection des plans  $P_1$  et  $P_2$  avec la surface  $S$ . Ces plans sont formés respectivement par les vecteurs  $(\mathbf{n}, \mathbf{e}_1)$  et  $(\mathbf{n}, \mathbf{e}_2)$ .

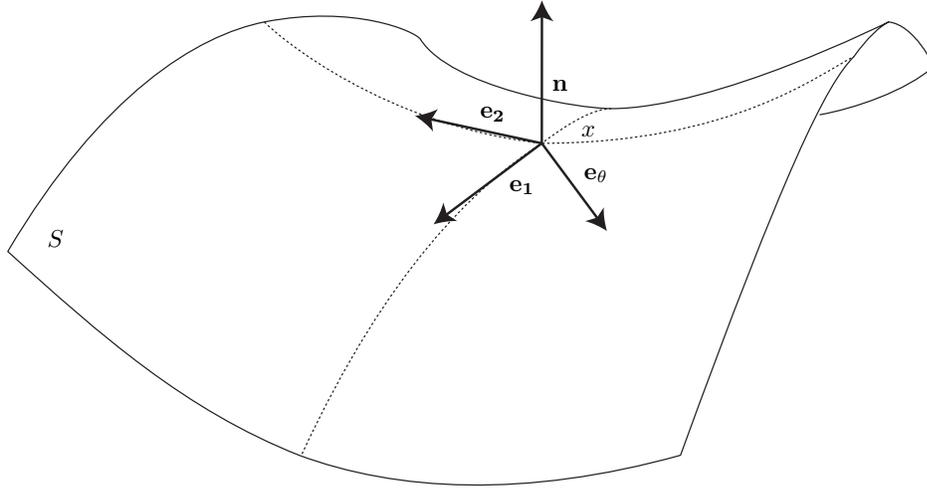


FIG. 4.2 – Illustration des courbures principales.

$S$  possède en chaque point  $x$  deux courbures principales : la courbure minimum  $k_1$  et la courbure maximum  $k_2$ . Les directions  $\mathbf{e}_1$  et  $\mathbf{e}_2$ , représentées à la figure 4.2, sont les directions principales associées aux courbures principales. Elles sont orthogonales sauf dans le cas du plan et de la sphère où toutes les directions offrent la même courbure.

Le théorème d'Euler permet d'exprimer la courbure normale d'une surface dans chaque direction  $e_\theta$ , à partir des courbures principales  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  et de l'angle  $\theta$  entre  $\mathbf{e}_1$  et  $\mathbf{e}_\theta$  :

$$K^N(\theta) = \kappa_1 \cdot \cos^2 \theta + \kappa_2 \cdot \sin^2 \theta \quad (4.2)$$

La courbure moyenne  $k_H$  est définie comme la moyenne des courbures normales :

$$\kappa_H = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} K^N(\theta) d\theta \quad (4.3)$$

$$= \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2} \quad (4.4)$$

La courbure gaussienne correspond au produit des deux courbures principales :

$$\kappa_G = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \quad (4.5)$$

La courbure gaussienne peut également s'exprimer sous forme d'une limite :

$$\kappa_G = \lim_{\text{diamètre}(\mathcal{A}) \rightarrow 0} \frac{\mathcal{A}^G}{\mathcal{A}} \quad (4.6)$$

où  $\mathcal{A}$  correspond à l'aire infinitésimale autour du point  $P$  de la surface (voir figure 4.3(a)) et  $\mathcal{A}^G$  est l'aire de la carte gaussienne de  $\mathcal{A}^G$  associée à  $\mathcal{A}$ .

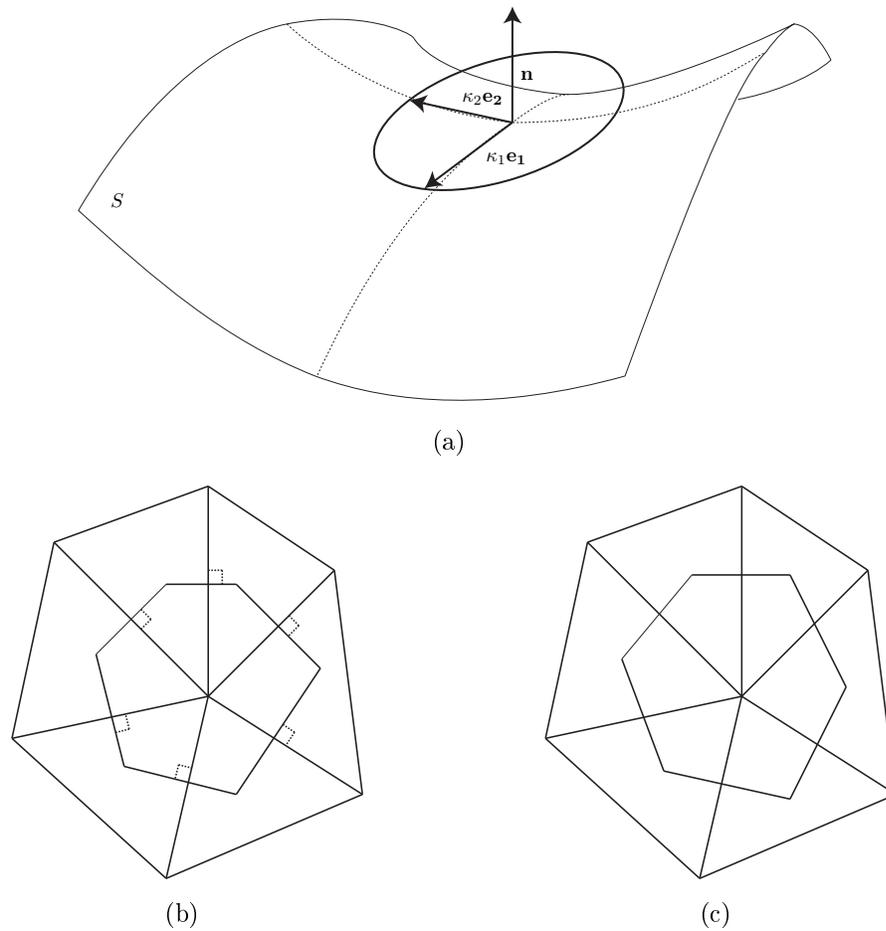


FIG. 4.3 – Régions locales : (a) un voisinage infinitésimal sur un carreau de surface continue, (b) cellules de Voronoï, (c) cellules barycentriques.

Les courbures « moyenne » et « gaussienne » sont les plus employées dans la littérature. Il en existe d'autres comme la courbure absolue et la courbure RMS (Root Mean Square curvature) :

$$\kappa_{abs} = |\kappa_1| + |\kappa_2| \quad (4.7)$$

$$\kappa_{RMS} = \sqrt{\frac{\kappa_1^2 + \kappa_2^2}{2}} \quad (4.8)$$

La courbure gaussienne dispose d'une propriété d'invariance isométrique de la surface aussi connue comme propriété intrinsèque de la surface. Ces propriétés ne tiennent pas compte de la manière dont est projetée la surface dans l'espace 3D et ne sont pas influencées par la direction du vecteur normal. Le signe de la courbure ne change pas lorsque l'orientation de la surface est inversée. La figure 2.19 met en avant les faiblesses de l'invariance isométrique pour la segmentation. Les courbures moyennes et absolues possèdent des propriétés extrinsèques qui dépendent de la projection de la surface dans l'espace 3D. L'orientation de la surface influence le signe de ces courbures qui correspondent à de meilleures caractéristiques pour la segmentation de maillages par LPE.

### La courbure discrète

Les définitions qui viennent d'être données ne peuvent s'appliquer directement aux maillages. Un maillage est une approximation plus ou moins grossière d'une surface. Les propriétés de la surface (les quantités géométriques) peuvent se définir comme des moyennes spatiales autour d'un vertex du maillage. L'aire moyenne dans laquelle pourra être caractérisée la courbure est notée  $\mathcal{A}_M$ . Elle est contenue dans le 1-voisinage des vertex et est délimitée par le milieu des arêtes reliant le vertex milieu à ses voisins. Une étude détaillée est proposée dans [Meyer *et al.*, 2003]. Dans ce qui suit, nous en reprenons les principaux concepts pour obtenir les opérateurs de courbure discrète.

Pour caractériser la zone sur laquelle va être calculée la courbure, les cellules de Voronoï ou les cellules barycentriques sont utilisées (figure 4.3). La première méthode offre une très bonne précision ; elle devient cependant limitée dans la cas de triangles obtus où la deuxième méthode est plus adaptée.

Soit un triangle non-obtus  $P, Q, R$ , dont le centre du cercle circonscrit est  $O$  (figure 4.4(b)). La région de Voronoï  $P$  peut se calculer à l'aide des propriétés des bissectrices :

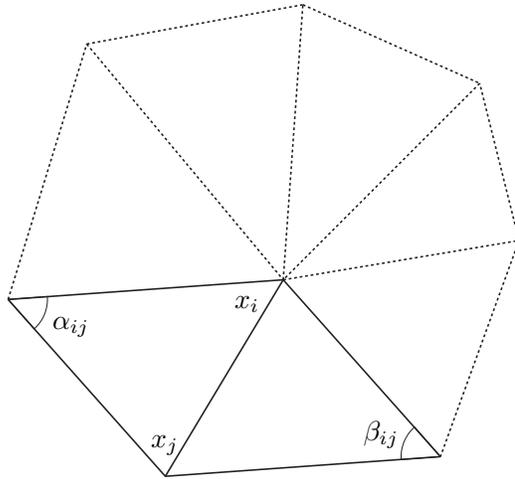
$$a + b + c = \frac{\pi}{2} \quad (4.9)$$

$$a = \frac{\pi}{2} - \widehat{R}, \quad b = \frac{\pi}{2} - \widehat{P}, \quad c = \frac{\pi}{2} - \widehat{Q} \quad (4.10)$$

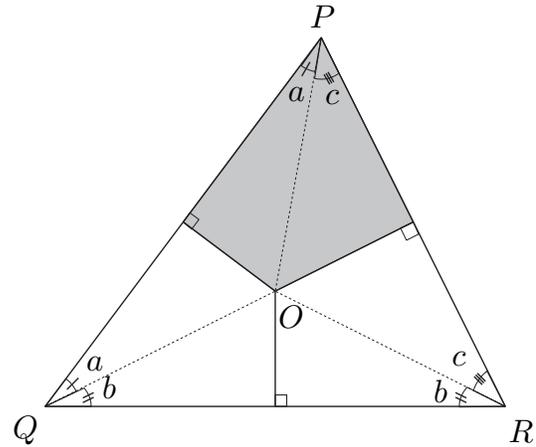
L'aire de Voronoï au point  $P$  peut être calculée si le triangle est non-obtus. Elle correspond à :

$$\mathcal{A}(P)_{Voronoi} = \frac{1}{8} \left( |PR|^2 \cdot \cotan \widehat{Q} + |PQ|^2 \cdot \cotan \widehat{R} \right) \quad (4.11)$$

Si le 1-voisinage du vertex milieu contient uniquement des triangles non-obtus, il est possible de définir l'aire de Voronoï du vertex  $x_i$  comme une fonction de ses voisins  $x_j$  (figure 4.4(a)).



(a) 1-voisinage du vertex  $x_i$  et les angles opposés à une arête.



(b) Région de Voronoï d'un triangle non-obtus.

FIG. 4.4 – Calcul de l'aire de Voronoï.

En réalisant la somme des aires de Voronoï de l'ensemble des triangles appartenant au 1-voisinage  $N_1(i)$  du vertex milieu, l'aire de Voronoï du vertex  $x_i$  peut s'écrire :

$$\mathcal{A}_{Voronoi} = \frac{1}{8} \sum_{j \in N_1(i)} (\cotan \alpha_{ij} + \cotan \beta_{ij}) \|x_i - x_j\|^2 \quad (4.12)$$

Dans le cas d'un 1-voisinage contenant des triangles obtus, il est possible d'approximer l'aire infinitésimale à l'aide de l'aire mélangée  $\mathcal{A}_M$  avec l'algorithme suivant :

---

**Algorithme 10** : Calcul de l'aire mélangée dans le cas d'un 1-voisinage contenant des triangles obtus.

---

```

début
   $\mathcal{A}_M \leftarrow 0$ 
  pour chaque triangle  $T$  du 1-voisinage de  $x$  faire
    si  $T$  est non-obtu alors
       $\mathcal{A}_M = \mathcal{A}_M + \mathcal{A}_{Voronoi}$  de  $x$  dans  $T$ 
    sinon si l'angle de  $T$  en  $x$  est obtu alors
       $\mathcal{A}_M = \mathcal{A}_M + \frac{aire(T)}{2}$ 
    sinon
       $\mathcal{A}_M = \mathcal{A}_M + \frac{aire(T)}{4}$ 
  fin

```

---

L'opérateur de courbure moyenne se caractérise par :

$$K(x_i) = \frac{1}{2 \cdot \mathcal{A}_M} \sum_{j \in N_1(i)} (\cotan \alpha_{ij} + \cotan \beta_{ij}) (x_i - x_j) \quad (4.13)$$

L'opérateur de courbure gaussienne discrète se définit par :

$$K_G(x_i) = \frac{1}{\mathcal{A}_M} \left( 2\pi - \sum_{j=1}^n \theta_j \right) \quad (4.14)$$

où  $n$  correspond au nombre de triangles du 1-voisinage.  $\theta_j$  correspond à l'angle du triangle  $j$  en  $x_i$ . La courbure gaussienne est parfois approximée à partir de l'équation :

$$K_G(x_i) = \frac{3}{\sum_{j=1}^n \text{aire}(T_j)} \left( 2\pi - \sum_{j=1}^n \theta_j \right) \quad (4.15)$$

Les courbures principales  $\kappa_1$  et  $\kappa_2$  peuvent être calculées à partir de  $K(x_i)$  et de  $K_G(x_i)$  :

$$\kappa_1(x_i) = K_H(x_i) + \sqrt{\Delta(x_i)} \quad (4.16)$$

$$\kappa_2(x_i) = K_H(x_i) - \sqrt{\Delta(x_i)} \quad (4.17)$$

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

La courbure des vertex peut être calculée à partir de la norme de la matrice de covariance. Elle apparaît dans de nombreux articles dont celui de [Mangan et Whitaker, 1999] qui représente une étude incontournable de la segmentation de maillages polygonaux par LPE. Elle n'a pas une signification géométrique directe mais présente les avantages d'être moins sensible au bruit et d'être facile à implémenter. La matrice de covariance se calcule à partir de la variance et de la covariance selon les trois directions cardinales. La variance et la covariance se définissent par :

$$\sigma_{aa}^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N (a_t - \bar{a})^2 \quad (4.18)$$

$$\sigma_{ab}^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N (a_t - \bar{a}) (b_t - \bar{b}) \quad (4.19)$$

$$a \in \{x, y, z\} \quad b \in \{x, y, z\} \quad (4.20)$$

où  $N$  représente le nombre de triangles appartenant au 1-voisinage du vertex milieu et  $[x_t \ y_t \ z_t]$ , les composantes de la normale du triangle  $t$ . La courbure  $D$  correspond à la

norme euclidienne de la matrice de covariance  $C$  :

$$D = \|C\| \quad C = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

La LPE sur les maillages peut être appliquée sur une structure d'éléments connectés comme les vertex, les arêtes et les faces. [Zuckerberger *et al.*, 2002] ont proposé d'utiliser une structure d'arêtes connectées avec la fonction de hauteur  $h = 1 - \alpha$  où  $\alpha$  correspond à l'angle dièdre d'une arête. Ce choix constitue une alternative à la norme de la matrice de covariance et a été justifié par une meilleure signification géométrique. Les auteurs n'ont cependant pas comparé cette approche avec les autres types de courbures.

### Caractérisation de la courbure d'une face

Pour analyser la courbure à un niveau moins local que le 1-voisinage d'un vertex, nous avons proposé dans [Delest *et al.*, 2006a] d'utiliser la norme de la matrice de covariance par rapport à une face et son voisinage de faces. La LPE est réalisée sur une structure de faces connectées. La complexité est plus importante que sur une structure de vertex connectés en raison d'un plus grand nombre de faces. Cette complexité est compensée par une meilleure qualité de segmentation. Les équations (4.18) à (4.21) peuvent être réutilisées en considérant le 1-voisinage d'une face milieu et en définissant  $\bar{a}$  et  $\bar{b}$  comme des composantes de la normale de cette face milieu. La figure 4.5 représente les normales des triangles qui sont utilisées pour calculer la norme de la matrice de covariance dans le cas d'une structure de vertex connectés et d'une structure de faces connectées.

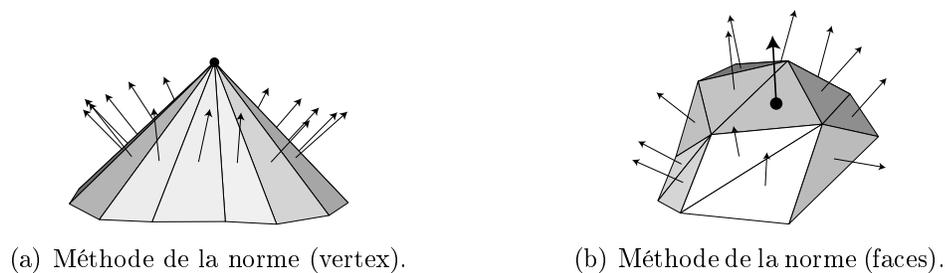


FIG. 4.5 – Calcul de la courbure à partir des normales des faces.

La figure 4.6 fait apparaître un objet 3D de type « selle » sur lequel est plaquée une texture correspondant à un type de courbure. La couleur noir / bleu indique une courbure faible tandis qu'une couleur rouge révèle une forte courbure. Dans cet exemple, les courbures issues de la norme de la matrice de covariance sur les vertex et sur les faces tendent vers le même résultat. [Pulla *et al.*, 2001] font remarquer que la courbure gaussienne n'est pas un bon indicateur des frontières d'un maillage et est plus sensible

au bruit que la courbure moyenne. Les auteurs présentent la courbure absolue comme la meilleure mesure de courbure pour la segmentation par LPE. Cette affirmation ne peut cependant pas être généralisée à tous les objets (formes naturelles, objets de C.A.O ayant de nombreux angles vifs, etc.) et types de segmentation.

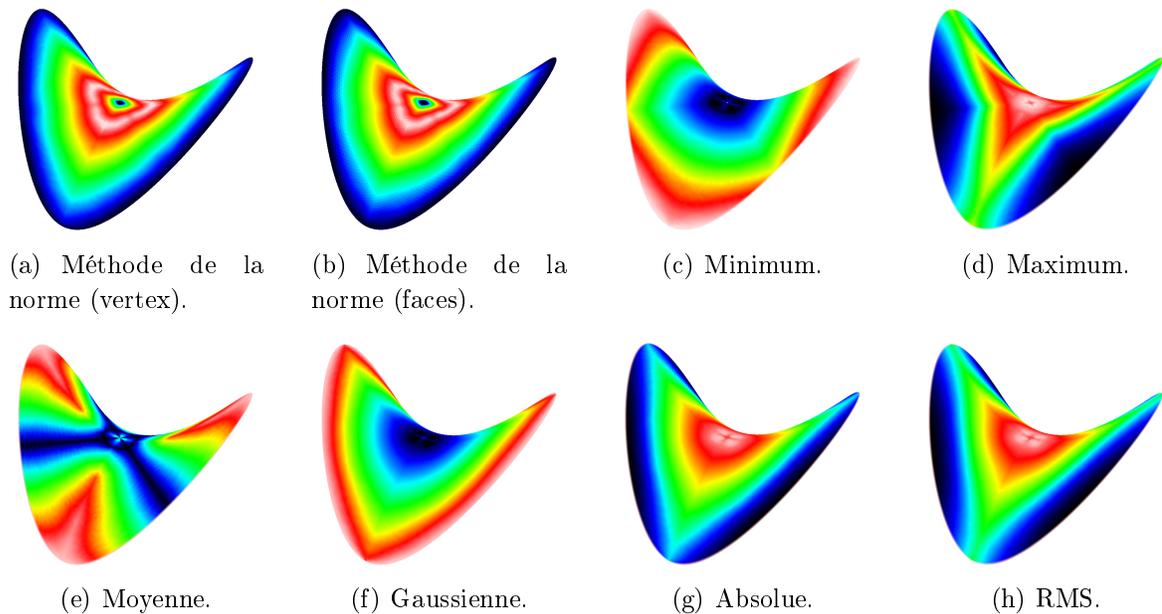


FIG. 4.6 – Illustration de différentes courbures sur une forme de type selle.

### Le tenseur de courbure

Il existe d'autres définitions de la courbure, notamment celles de [Taubin, 1995] et de [Cohen-Steiner et Morvan, 2003]. Ces études abordent la détermination d'un tenseur de courbure pour le calcul des courbures et directions principales. Cohen-Steiner et Morvan ont fait remarquer qu'un tenseur de courbure peut être défini en chaque point le long d'une arête, ce qui permet d'intégrer cette ligne de densité de tenseur par rapport à une région arbitraire  $B$ .

Soit un vertex  $v$  ainsi qu'une petite portion  $B$  du maillage  $T$  entourant  $v$ . A chaque arête  $e$  de  $B$  est associé un angle dièdre  $\beta_e$  correspondant à l'angle formé par les normales des deux faces incidentes à cette arête. Cet angle est négatif s'il est concave et positif s'il est convexe. On définit également  $\vec{e}$ , le vecteur unité parallèle à l'arête  $e$ , ainsi que  $\vec{e}^t$ , son vecteur transposé.

Le tenseur de courbure  $H_B(v)$  du vertex  $v$  peut s'exprimer sous la forme :

$$H_B(v) = \frac{1}{|B|} \sum_{e \in B} \beta_e |e \cap B| \cdot \vec{e} \vec{e}^t \quad (4.22)$$

où  $v$  est un vertex arbitraire du maillage,  $|B|$ , l'aire de la portion  $B$  entourant  $v$  et  $|e \cap B|$ , la longueur de l'arête  $e \cap B$  (toujours comprise entre 0 et  $|e|$ ).

Le tenseur de courbure est utilisé dans [Alliez *et al.*, 2003a] pour extraire des directions des courbures principales et déduire des lignes de courbures afin de réaliser un remaillage anisotropique. Un tenseur de courbure est évalué en chaque vertex  $v$ , pour un voisinage  $B$  approximant un disque géodésique autour de  $v$ . Ce disque peut correspondre à l'intersection d'une sphère et du maillage. Un rayon équivalent à 1/100 de la diagonale de la boîte englobante de l'objet permet une bonne approximation du tenseur de courbure. La normale en chaque vertex est définie à partir du vecteur propre de  $H_B(v)$  associé à la valeur propre la plus petite. Les deux valeurs propres restantes  $k_1$  et  $k_2$  sont des estimations des courbures principales de  $v$ . Remarquons que les directions associées à ces courbures sont permutées : le vecteur propre associé à la seconde plus petite valeur propre correspond à la direction de la courbure principale la plus forte et la troisième valeur propre est associée à la courbure principale la plus faible.

Ce tenseur de courbure est utilisé dans [Lavoué *et al.*, 2005b] pour réaliser la classification des vertex à partir des courbures principales (indépendante de la disposition spatiale) puis le partitionnement du maillage polygonal.

Nous présentons au chapitre 6 une comparaison des segmentations de maillages polygonaux par LPE obtenues à partir des différentes courbures et de la distance inverse aux lignes de crêtes. Ce comparatif met en avant la norme de la matrice de covariance pour une structure de faces connectées ainsi que la fonction de distance. La courbure absolue est proposée comme la fonction de hauteur la plus adaptée pour la segmentation par LPE dans [Pulla *et al.*, 2001] ; nos expérimentations ont montré que d'autres fonctions lui sont supérieures.

Les directions principales issues du tenseur de courbure sont des informations très importantes. Nous verrons à la section suivante qu'elles sont utilisées pour calculer une fonction de hauteur relative à la distance aux lignes de crêtes d'un maillage.

### La courbure directionnelle

[Page *et al.*, 2003b] ont proposé une méthode de LPE utilisant la loi des minima (voir section 2.4.1). Une carte des hauteurs est définie sur tout le maillage de telle sorte que l'arête reliant les vertex  $v_j$  et  $v_i$  dispose d'une hauteur  $h_{ji}$  relative à la courbure locale entre ces deux vertex. La formule d'Euler de la courbure de la surface établit une courbure normale le long d'une direction particulière. Pour la hauteur de la courbure locale, cette direction correspond à  $\overrightarrow{v_j v_i}$ . Le vecteur unité tangent  $T_{ji}$  en  $v_j$  associé à

cette direction est défini par :

$$T_{ji} = \frac{\mathbf{T}_j(v_i - v_j)}{v_i - v_j} \quad (4.23)$$

$\mathbf{T}_j$  est une matrice  $3 \times 3$  qui projette le vecteur de direction  $(v_i - v_j)$  dans le plan tangent à  $v_j$ . Cette matrice est définie par :

$$\mathbf{T}_j = \mathbf{I} - N_j N_j^t \quad (4.24)$$

$\mathbf{I}$  correspond à la matrice identité et le vecteur  $N_j$  à la normale de la surface en  $v_j$ . La courbure normale  $k_{ji}$  peut alors être calculée à partir de la formule d'Euler :

$$k_{ji} = h_{ji} = k_1 \cdot \cos^2(\theta_i) + k_2 \cdot \sin^2(\theta_i) \quad (4.25)$$

$k_1$  et  $k_2$  représentent respectivement les courbures principales maximum et minimum en  $v_j$ . L'angle  $\theta_i$  correspond à l'angle entre  $T_{ji}$  et la direction  $T_1$  de la courbure maximum du vertex  $v_j$  :

$$\cos(\theta_i) = T_{ji}^t \cdot T_1 \quad (4.26)$$

$k_{ji}$  correspond à la hauteur directionnelle de  $v_j$  à  $v_i$ . Cette définition de la hauteur permet au procédé de LPE d'inonder les vertex de courbures similaires. La progression est ralentie lors d'une rencontre avec des courbures négatives qui caractérisent une pente plus importante.

Nous avons vu à cette section les types de courbures généralement utilisés en segmentation de maillages polygonaux. La récente étude de [Bac *et al.*, 2005] propose une analyse détaillée de la courbure discrète suivant des approches basées sur la différence d'angle ou bien l'approximation locale. Une perspective liée à notre travail consiste à expérimenter un plus grand nombre de fonctions de hauteur basées sur les courbures décrites dans cette étude.

### 4.3 La distance aux lignes de crêtes

Les lignes de crêtes correspondent aux caractéristiques saillantes de la surface et font partie des lignes extrémales définies à partir des premier et second ordres des dérivées des courbures. Les lignes extrémales sont représentées par des courbes telles qu'en chacun de leur point, la courbure principale a un extremum le long de sa ligne de courbure. Ces lignes codent des informations importantes pour les applications de segmentation, de recalage, de comparaison et d'analyse de surface.

Les lignes de crêtes représentent de très bons indicateurs des frontières pour la segmentation de maillages. Par exemple, [Page *et al.*, 2006] proposent de déterminer les lignes de crêtes à partir de la loi des minima et de ne retenir que les lignes les plus importantes en terme de perception visuelle. Les lignes sont ensuite fermées et connectées à partir de champs potentiels artificiels pour former les frontières des régions pour la segmentation. [Yoshizawa *et al.*, 2005] ont utilisé la caractérisation des lignes de crêtes dans plusieurs applications dont la segmentation de maillages. Yoshizawa *et al.* font intervenir ces lignes dans la phase d'extraction des caractéristiques de [Lévy *et al.*, 2002]. Plutôt que d'utiliser la méthode de croissance de régions proposée par Lévy *et al.* afin de réaliser la segmentation, nous avons directement utilisé la distance inverse aux lignes de crêtes comme fonction de hauteur pour la LPE.

### Les lignes de crêtes

Considérons une surface orientée et lisse  $S$ . Ses courbures principales sont notées  $\kappa_1$  et  $\kappa_2$  et ses directions principales associées,  $t_1$  et  $t_2$ . Soit  $e_1$  et  $e_2$ , les dérivées des courbures principales selon les directions principales :

$$e_1 = \frac{\partial \kappa_1}{\partial t_1} \quad (4.27)$$

$$e_2 = \frac{\partial \kappa_2}{\partial t_2} \quad (4.28)$$

$e_1$  et  $e_2$  correspondent aux coefficients d'extrémalité [Thirion, 1996]. Ces coefficients ne sont pas définis sur les points ombiliques ( $\kappa_1 = \kappa_2$ ) du fait que les directions principales ne peuvent être établies dans ce cas particulier. Les lignes de crêtes correspondent à des lignes extrémales saillantes convexes ou concaves. Les lignes de crêtes convexes sont définies par :

$$e_2 = 0, \quad \frac{\partial e_2}{\partial t_2} < 0, \quad \kappa_2 > |\kappa_1| \quad (4.29)$$

et les lignes de crêtes concaves par :

$$e_1 = 0, \quad \frac{\partial e_1}{\partial t_1} > 0, \quad \kappa_1 < -|\kappa_2| \quad (4.30)$$

Pour réaliser la connexion des points appartenant aux lignes de crêtes, on pourra se référer à [Yoshizawa *et al.*, 2005] et [Ohtake *et al.*, 2004]. Parmi les récentes études sur les lignes de crêtes, on pourra remarquer les travaux de [Hildebrandt *et al.*, 2005], [Yoshizawa *et al.*, 2007] ainsi que [Cazals et Pouget, 2005] dont la méthode a été implémentée dans CGAL<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>CGAL, Computational Geometry Algorithms Library, <http://www.cgal.org>

### La distance aux lignes de crêtes

Un des moyens de calculer la distance aux lignes de crêtes est la méthode de progression rapide (*Fast Marching*) développée à l'origine dans [Sethian, 1996] et étendue aux maillages dans [Kimmel et Sethian, 1998]. Les distances s'évaluent et se mettent à jour selon un front de propagation initialisé sur chaque ligne de crêtes. Les points appartenant aux lignes de crêtes ont une distance nulle. La distance géodésique entre les lignes de crêtes et les vertex du maillage se calculent en résolvant l'équation Eikonal de  $T$  :

$$|\nabla T(x)| = 1 \in \Omega \quad (4.31)$$

$$T(x) = 0 \in \Gamma \quad (4.32)$$

où  $\Omega$  est l'ensemble des vertex non parcourus et  $\Gamma$ , l'ensemble des vertex parcourus. La fonction  $T(x)$  correspond au temps que prend le voyage de  $\Gamma$  à  $x$ . La vitesse de propagation devant être la même en tout point,  $T$  est équivalent aux distances géodésiques. Cette équation se résout en utilisant la méthode décrite par l'algorithme 11.

Les vertex peuvent recevoir les labels *Non parcouru*, *Définitif* ou *Bande étroite* selon qu'ils appartiennent aux ensembles  $\Omega$ ,  $\Gamma$  ou au front de propagation défini comme *Bande étroite* (*narrowband*). Cet algorithme fait intervenir une liste toujours triée ; il revient donc au concepteur d'implémenter les opérations d'addition et de mise à jour en sachant que pour le dernier cas, un vertex sera toujours déplacé vers les premiers éléments de la liste. Seul le premier élément de la liste peut être retiré. Il est à remarquer que tous les vertex étiquetés *Bande étroite* sont ajoutés et traités indépendamment de leur proximité à une ligne de crête particulière. Il y a donc plusieurs fronts de propagations qui évoluent en même temps. Les derniers vertex atteints par le front vont représenter les minima de la fonction de hauteur pour la LPE.

Les vertex les plus éloignés localement des lignes de crêtes vont représenter les minima locaux de la fonction inverse de la distance aux lignes de crêtes. Ils deviennent naturellement les nouvelles sources d'inondation de la LPE.

La figure 4.7 représente la carte des distances aux lignes de crêtes de plusieurs modèles 3D. Les zones rouges indiquent une proximité forte aux lignes de crêtes tandis que les bleu foncé révèlent un fort éloignement. Les lignes vertes et bleues correspondent respectivement à des lignes convexes et concaves.

Pour améliorer la précision des distances géodésiques sur un maillage, certaines méthodes ont recours à un dépliage local de ce maillage pour créer de nouvelles arêtes. [Hilaga *et al.*, 2001] proposent par exemple de calculer la distance euclidienne entre certains sommets appartenant au voisinage d'une face de la portion de maillage déplié.

La figure 4.8 illustre l'algorithme de calcul de ces nouvelles arêtes. Les triangles  $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$  qui sont voisins du triangle  $t_c$  sont dépliés selon le plan de  $t_c$  (figure 4.8(b)). Les nouvelles arêtes sont générées entre chaque paire de vertex seulement si l'arête se situe à l'intérieur du polygone déplié composé des sommets  $\{u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3\}$ . Une seule arête n'a pu être générée à la figure 4.8(c); il s'agit de l'arête  $(v_2, v_3)$  qui se trouve à l'extérieur du polygone. La figure 4.8(d) représente les distances géodésiques sur la portion de maillage non dépliée.

---

**Algorithme 11** : Calcul de la distances aux lignes de crêtes
 

---

```

début
  /* Initialisation                                     */
  ListeTriée  $\leftarrow \emptyset$ 
  pour chaque vertex  $v \in \Omega$  faire
     $T_v \leftarrow \infty$ 
     $L_v \leftarrow$  Non parcouru
  pour chaque vertex  $v \in \Gamma$  faire
     $T_v \leftarrow 0$ 
     $L_v \leftarrow$  Définitif
    pour chaque voisin  $q$  de  $v$  faire
      si  $L_q =$  Bande étroite alors
         $T_q \leftarrow$  Distance( $v, q$ ) /* Mise à jour de la distance */
        Déplacer  $q$  à la place qui correspond à sa distance dans ListeTriée
      sinon si  $L_q =$  Non parcouru alors
         $T_q \leftarrow$  Distance( $v, q$ )
         $L_q \leftarrow$  Bande étroite
        Insérer  $q$  dans ListeTriée à la place qui correspond à sa distance
    /* Propagation                                     */
  tant que ListeTriée  $\neq \emptyset$  faire
    Extraire le premier vertex  $v$ 
     $L_v \leftarrow$  Définitif /*  $v$  appartient maintenant à  $\Gamma$  */
    pour chaque voisin  $q$  de  $v$  faire
      si  $L_q =$  Bande étroite alors
         $T_q \leftarrow$  Distance( $v, q$ ) /* Mise à jour de la distance */
        Déplacer  $q$  à la place qui correspond à sa distance dans ListeTriée
      sinon si  $L_q =$  Non parcouru alors
         $T_q \leftarrow$  Distance( $v, q$ )
         $L_q \leftarrow$  Bande étroite
        Insérer  $q$  dans ListeTriée à la place qui correspond à sa distance
  fin

```

---

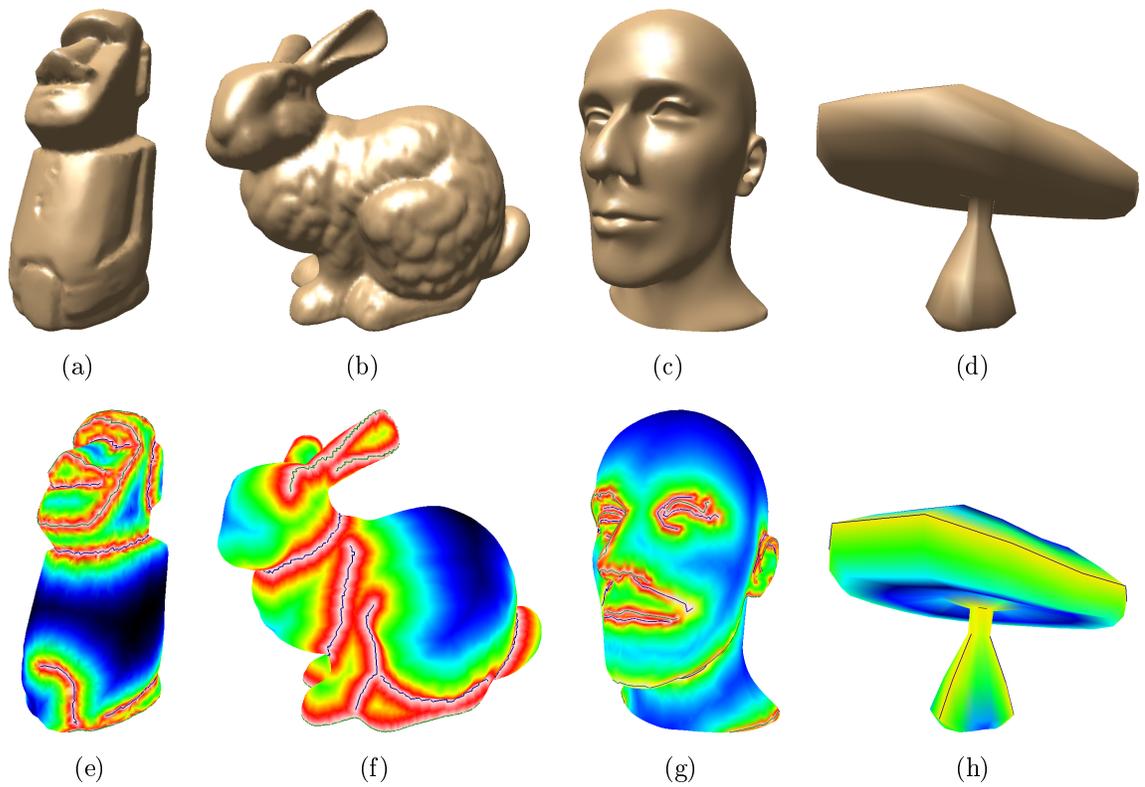


FIG. 4.7 – Carte des distances aux lignes de crêtes.

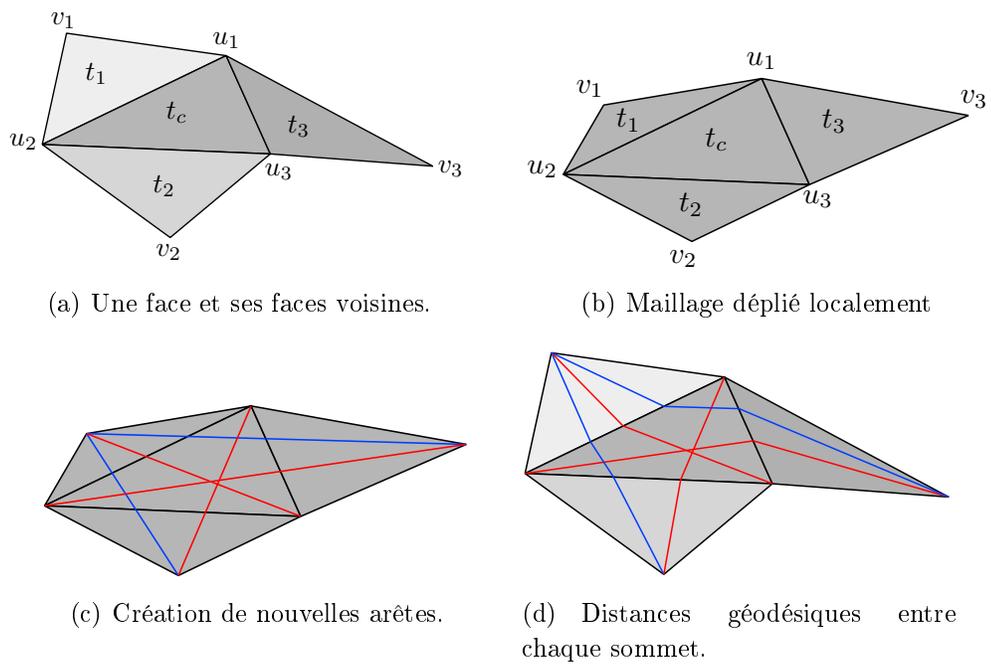


FIG. 4.8 – Dépliage local du maillage.

[Rettmann *et al.*, 2002] ont utilisé une approche similaire dans le cadre d'une application médicale pour séparer les régions « sulcales » (ensemble  $\Omega$ ) de la surface corticale à l'aide de la LPE et d'une fonction de hauteur relative à la distance aux régions « gyrales » (ensemble  $\Gamma$ ). Concernant les images 2D, [Ikonen, 2007] ont récemment proposé une méthode de calcul des distances géodésiques à partir d'une file prioritaire de pixels en utilisant les spécificités du voisinage d'un pixel d'une image.

Nous venons de voir les principales fonctions de hauteurs utilisées avec la LPE sur les maillages polygonaux. Elles font intervenir des caractéristiques géométriques de la surface. [Lai *et al.*, 2007] ont réalisé une étude des caractéristiques dans le cadre du remaillage et de la segmentation. Ils proposent une classification automatique des caractéristiques selon les crêtes, les vallées et les extrémités. [Roudet *et al.*, 2007] ont abordé la problématique de la segmentation à partir de la multirésolution. Les coefficients d'ondelette peuvent servir de mesure de rugosité à partir de laquelle l'algorithme de [Lavoué *et al.*, 2004], basé sur la classification et la croissance de régions, réalisera la segmentation. La caractérisation de la surface est une étape essentielle pour la segmentation, notamment pour la LPE où la fonction de hauteur est directement liée aux caractéristiques. Une des perspectives de notre travail est l'étude de nouvelles fonctions de hauteur intégrant ces différentes caractéristiques.

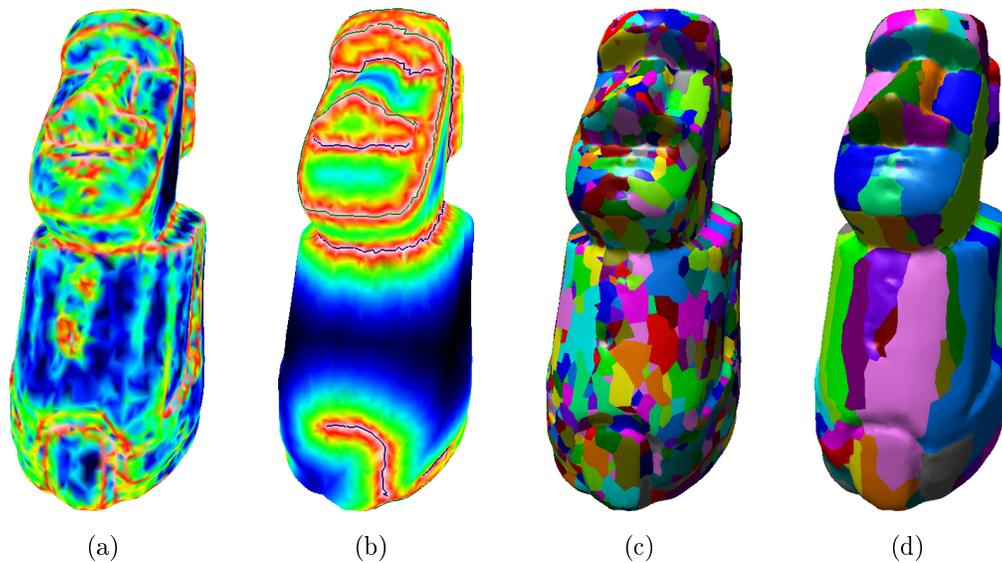


FIG. 4.9 – Sur-segmentation de la LPE sur le modèle *Moaï*. Représentation de la courbure (a), de la distance aux lignes de crête (b), de la segmentation par LPE à partir de la courbure (c) et de la distance inverse aux lignes de crête (d).

Il est rare que le procédé de LPE utilisé seul conduise directement à une bonne segmentation. Les figures 4.9(a) et 4.9(b) représentent les fonctions de hauteur relatives à la courbure et aux lignes de crêtes. Des exemples de segmentation par LPE en utilisant

ces fonctions de hauteur sont illustrés sur les figures 4.9(c) et 4.9(d). La méthode de segmentation correspond à la LPE par FAH (décrite à la section 3.1). Les courbures génèrent un relief comportant trop de minima, il en résulte une sur-segmentation qui rend inexploitable le résultat. Les distances aux lignes de crêtes offrent beaucoup moins de sources d'inondation mais le résultat demeure sur-segmenté. Nous verrons au chapitre suivant des stratégies de fusion basées sur les cascades et les dynamiques. La segmentation hiérarchique qui résulte de ces traitements offre plusieurs niveaux de segmentation qu'il est possible de visionner rapidement pour déterminer le plus adapté à l'application.

# Chapitre 5

## Les stratégies pour éviter la sur-segmentation

La LPE est un outil de segmentation très efficace mais elle demande une fonction de hauteur adaptée ainsi qu'un positionnement précis des sources d'inondation. Dans certains cas, il est possible de définir ces sources de façon manuelle ou automatique ; dans les autres cas, des stratégies comme la segmentation hiérarchique doivent être mises en place.

Certaines méthodes de segmentation interactive font intervenir le placement manuel de quelques points de frontières ou représentants de régions. [Ji *et al.*, 2006] utilisent une interface de dessin à partir de laquelle l'utilisateur peut définir des marqueurs sur le modèle 3D. Une croissance de régions est ensuite réalisée pour établir les frontières. La détermination automatique de marqueurs est un problème complexe et ne peut généralement pas s'appliquer à tous les types de modèle et d'application. Nous proposons une méthode de génération automatique de marqueurs pour la LPE 3D à la section 5.2 ; la segmentation correspond au repérage des segments du squelette de la forme 3D, au marquage des faces du maillage liées aux segments puis à la labellisation de tout le maillage à partir de la LPE. Cette segmentation est adaptée aux modèles de type « humain », « animal », ou « tubulaire » mais n'offrira pas de bons résultats sur des modèles ayant un maillage ouvert ou sur des modèles de type « visage », « pièces mécaniques », etc. Ce type de segmentation correspond au découpage de l'objet en parties significatives ; les informations géométriques de la surface sont utilisées uniquement pour déterminer les frontières entre deux régions marquées. La segmentation hiérarchique est une alternative lorsqu'aucun *a priori* ne peut être utilisé pour la segmentation. Nous proposons à la section suivante une approche de segmentation hiérarchique en carreaux surfaciques.

## 5.1 La segmentation hiérarchique de maillages à l'aide de la LPE

Nous avons pu voir à la section 3.3 différents types de segmentation hiérarchique d'image 2D utilisant la LPE. La littérature concernant ces mêmes approches appliquées aux maillages polygonaux est relativement pauvre : il y a peu de travaux portant sur la segmentation de maillages à partir de la LPE et la plupart des méthodes sont focalisées sur la recherche de la meilleure fonction de hauteur. Pour corriger la sur-segmentation, la méthode généralement utilisée repose sur le seuillage de la profondeur de la LPE. Le seuil, s'il en existe un pertinent, n'est pas facile à fixer. Le stockage de l'arbre contenant les différents niveaux de segmentation est envisageable mais le nombre de niveaux à parcourir peut être relativement important pour trouver celui qui convient le mieux. Nous rappelons dans ce qui suit la chaîne globale de traitement, l'approche de [Mangan et Whitaker, 1999] basée sur la profondeur de la LPE et présentons les améliorations que nous avons apportées, basées sur les cascades et les dynamiques de contour.

La figure 5.1 illustre la chaîne de traitement qui comprend le calcul de la fonction de hauteur, la segmentation par LPE avec les files d'attente hiérarchiques et la segmentation finale obtenue par la fusion des régions.

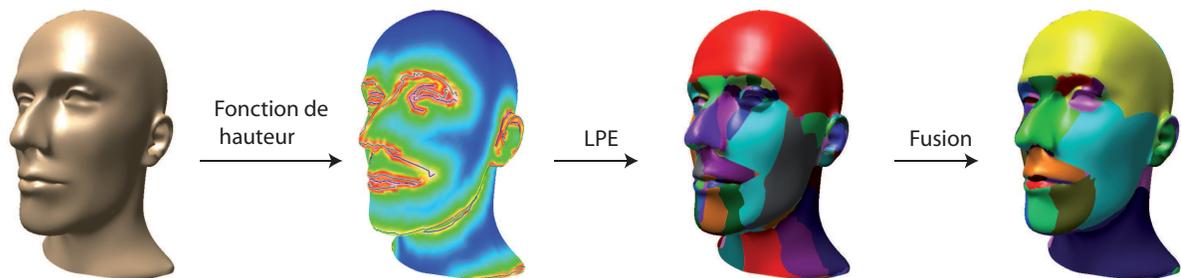
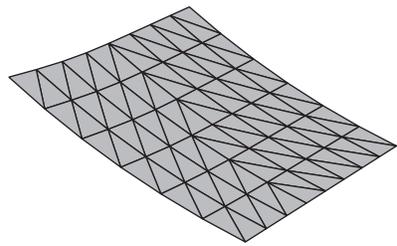


FIG. 5.1 – Les différentes étapes de la segmentation hiérarchique.

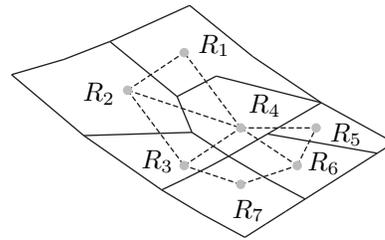
Le procédé complet de segmentation est généralisable à plusieurs fonctions de hauteur. Nous mettons en avant dans ce chapitre les fonctions de hauteur relatives à la courbure ou bien à la distance aux lignes de crêtes mais d'autres fonctions, comme la distance aux points selles abordée en perspectives au chapitre 7, peuvent être employées. La méthode de LPE par FAH décrite par l'algorithme 9 offre une première partition sur-segmentée. Les frontières des régions issues de la LPE sont ensuite caractérisées pour établir une hiérarchie de régions à fusionner.

### 5.1.1 La profondeur de la LPE

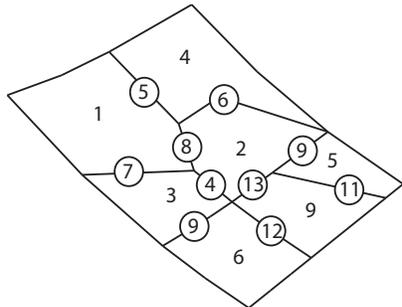
Pour définir une hiérarchie entre les régions et décider de celles qui doivent fusionner en premier, [Mangan et Whitaker, 1999] ont proposé un critère basé sur la profondeur de la LPE. Ce critère est associé à la frontière de deux régions et en définit la hauteur. La profondeur de la LPE représente la différence entre la hauteur du point selle et la valeur maximale des minima des bassins adjacents. La méthode de Mangan et Whitaker ainsi que l'algorithme de fusion ont été présentés à la section 3.4. Nous proposons en annexe A les différentes étapes de fusions appliquées à la partition de la figure 5.2(d).



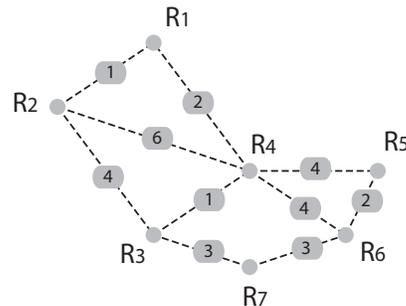
(a) Maillage polygonal.



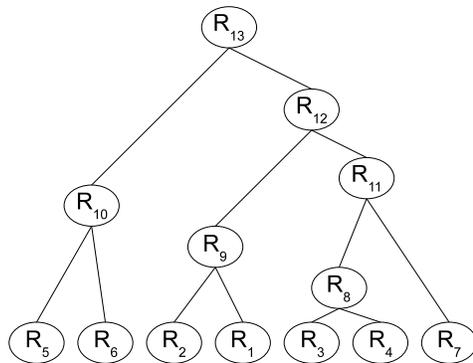
(b) Graphe dual de la partition.



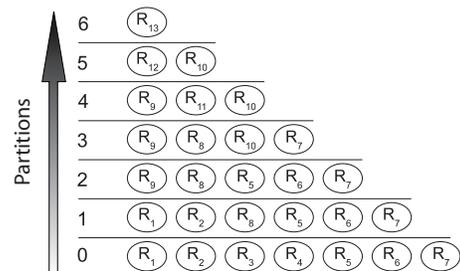
(c) Minima des bassins et hauteur des points selles.



(d) Arcs valués à partir de la profondeur de la LPE



(e) Arbre de fusion.



(f) Régions des différentes partitions.

FIG. 5.2 – Création de l'arbre de fusion à partir de la profondeur de la LPE.

Le résultat de cette segmentation hiérarchique correspond à la création de six nouvelles régions issues de la fusion ainsi que de sept niveaux hiérarchiques, le niveau 0 étant le résultat de la LPE et le niveau 6, une partition composée d'une seule région (figures 5.2(e) et 5.2(f)). La segmentation s'obtient ainsi soit en définissant un seuil par rapport à la profondeur de la LPE, soit en stockant tous les niveaux de segmentation et en laissant le choix du niveau à l'utilisateur. La difficulté réside dans le choix du seuil ou bien du niveau. Le nombre de niveaux, qui est lié au nombre de régions créées, peut être très important. Dans le cas du modèle « Mushroom » présenté à la figure 5.3, ce nombre s'élève à 24 pour la fonction de hauteur relative à la courbure et à 5 si la distance géodésique relative aux lignes de crêtes est utilisée. Ce modèle n'est pas d'une résolution très élevée (226 vertex, 448 faces). Dans le cas de modèles plus complexes, il n'est pas envisageable d'utiliser ce type de fusion tant le nombre de niveaux est important (1106 niveaux sur le modèle « Moaï » de 10000 vertex par exemple).

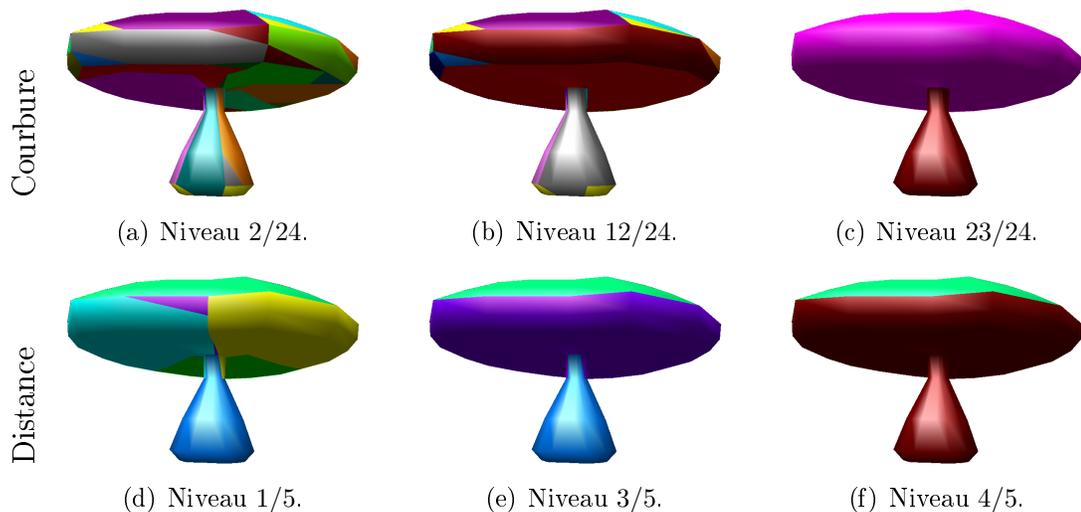


FIG. 5.3 – Différents seuils de la profondeur de la LPE. Les figures (a) à (c) représentent les segmentations obtenues à partir de la courbure et les figures (d) à (f), celles obtenues à partir de la fonction de distance relative aux lignes de crêtes.

Le tableau 5.1 fait apparaître les niveaux qui ont été retenus en visionnant l'intégralité des niveaux de l'arbre de fusion. Les segmentations relatives à ces niveaux sont disponibles à la figure 5.3.

Fonction de hauteur	Meilleur Niveau	Nombre de niveaux
Courbure	23	24
Distance	3	5

TAB. 5.1 – Nombre de niveaux selon la fonction de hauteur utilisée

La profondeur de la LPE est un critère potentiellement applicable sur des modèles de faible résolution mais est inadaptée pour la plupart des modèles 3D de référence ainsi que pour les modèles un tant soit peu complexes. Pour réaliser la segmentation hiérarchique des maillages polygonaux, nous avons préféré nous orienter vers des stratégies qui ont fait leur preuve en segmentation d'image et qui n'avaient pas été adaptées aux maillages polygonaux.

### 5.1.2 Les cascades

Nous avons appliqué le concept des cascades 2D (voir section 3.3.2) aux maillages polygonaux dans [Betser *et al.*, 2005][Betser *et al.*, 2006] puis optimisé leur structure sous forme de graphe dans [Delest *et al.*, 2006b]. Le procédé des cascades est utilisé sur la partition générée par la LPE. L'arbre de poids minimum permet de définir le chemin emprunté par l'inondation à partir des minima. Il a été utilisé dans [Marcotegui et Beucher, 2005] pour construire le schéma de fusion des cascades. Les arcs considérés comme minima locaux représentent les points de départ d'une inondation qui évolue sur

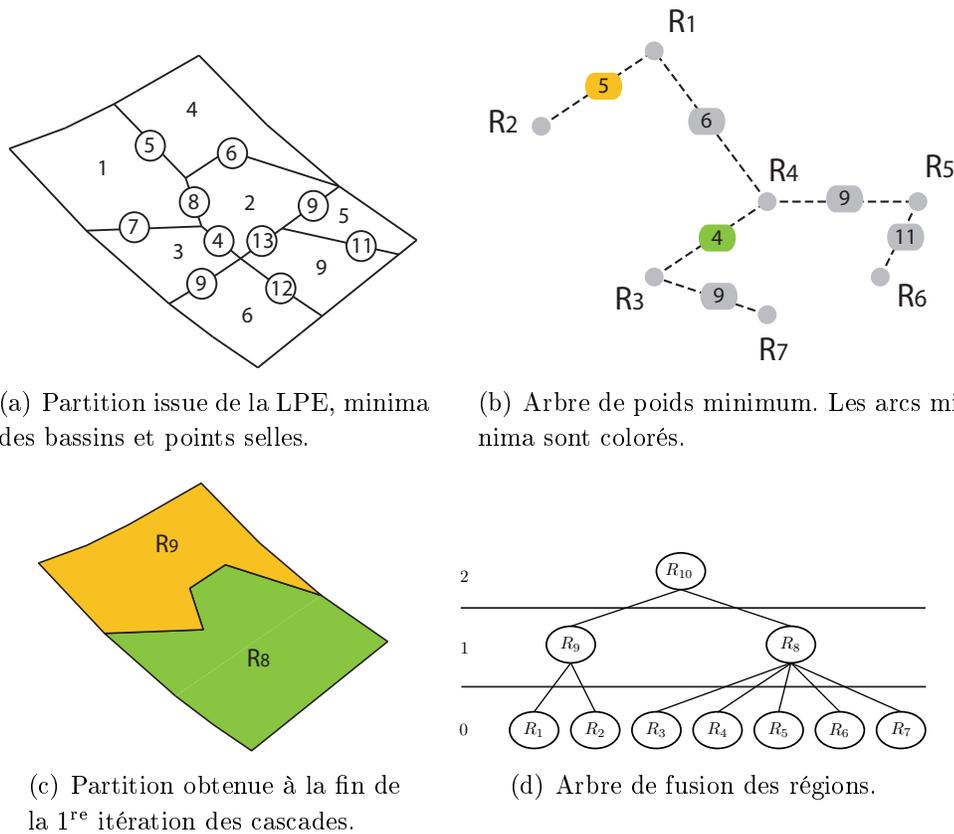


FIG. 5.4 – Segmentation à partir des cascades.

les arcs de l'arbre de poids minimum. Des exemples de construction de l'arbre de poids minimum sont proposés en annexe A.2 et A.3. La figure 5.4(b) représente l'arbre de poids minimum généré à partir du résultat de la LPE. Les arcs minima locaux apparaissent en couleur et correspondent aux sources d'inondation des cascades. Les différents arcs de l'arbre sont successivement inondés et associés à une région. L'inondation aboutit à une partition composée à la première itération des cascades de deux régions. Cette partition est la plus intéressante car celle du niveau suivant correspond à la fusion de toutes les régions (figure 5.4). Les différents niveaux de segmentation peuvent être stockés dans un arbre de fusion (figure 5.4(d)). Dans l'exemple, le niveau 0 correspond au résultat de la LPE et comprend les régions  $\{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7\}$ , le niveau 1 les régions  $\{R_8, R_9\}$  et le niveau 2 la région  $\{R_{10}\}$ . La sélection d'un niveau implique que chaque région de ce niveau ait ses régions filles fusionnées.

La figure 5.5 montre plusieurs segmentations à partir des cascades réalisées sur les modèles « Moaï », « Mannequin » et « Stanford Bunny ». La fonction de hauteur utilisée ici correspond à la distance aux lignes de crêtes. Quatre niveaux de segmentation sont proposés pour chaque modèle. Les caractéristiques des différentes segmentations apparaissent dans le tableau 5.2. Le paramètre « longueur des lignes » correspond au pourcentage de la longueur de la plus grande ligne de crête. Ce pourcentage permet de filtrer les lignes de crêtes en fonction de leur longueur pour ne conserver que les plus significatives pour la segmentation. Les niveaux de segmentation visuellement les plus pertinents correspondent aux cases grises du tableau. Un filtre sur les lignes de crêtes a été appliqué pour ne garder que les plus significatives. L'évaluation de la segmentation de maillages polygonaux est difficile [Attene *et al.*, 2006b] et, dans la plupart des cas, celle-ci est réalisée de façon visuelle. Les modèles ont été choisis par rapport aux caractéristiques sémantiques qu'ils font ressortir comme les différentes régions du visage ou bien certaines parties du corps.

Modèles	Longueur des lignes (%)	Nombre de régions par niveau						
		0	1	2	3	4	5	6
Mannequin	50	156	61	26	11	9	1	-
Moaï	20	162	75	36	20	4	1	-
Stanford Bunny	70	267	118	47	22	11	2	1
Niveau		0	1	2	3	4	5	6

TAB. 5.2 – Segmentations de plusieurs modèles réalisées à partir des cascades et de la fonction de hauteur relative à la distance aux lignes de crêtes.

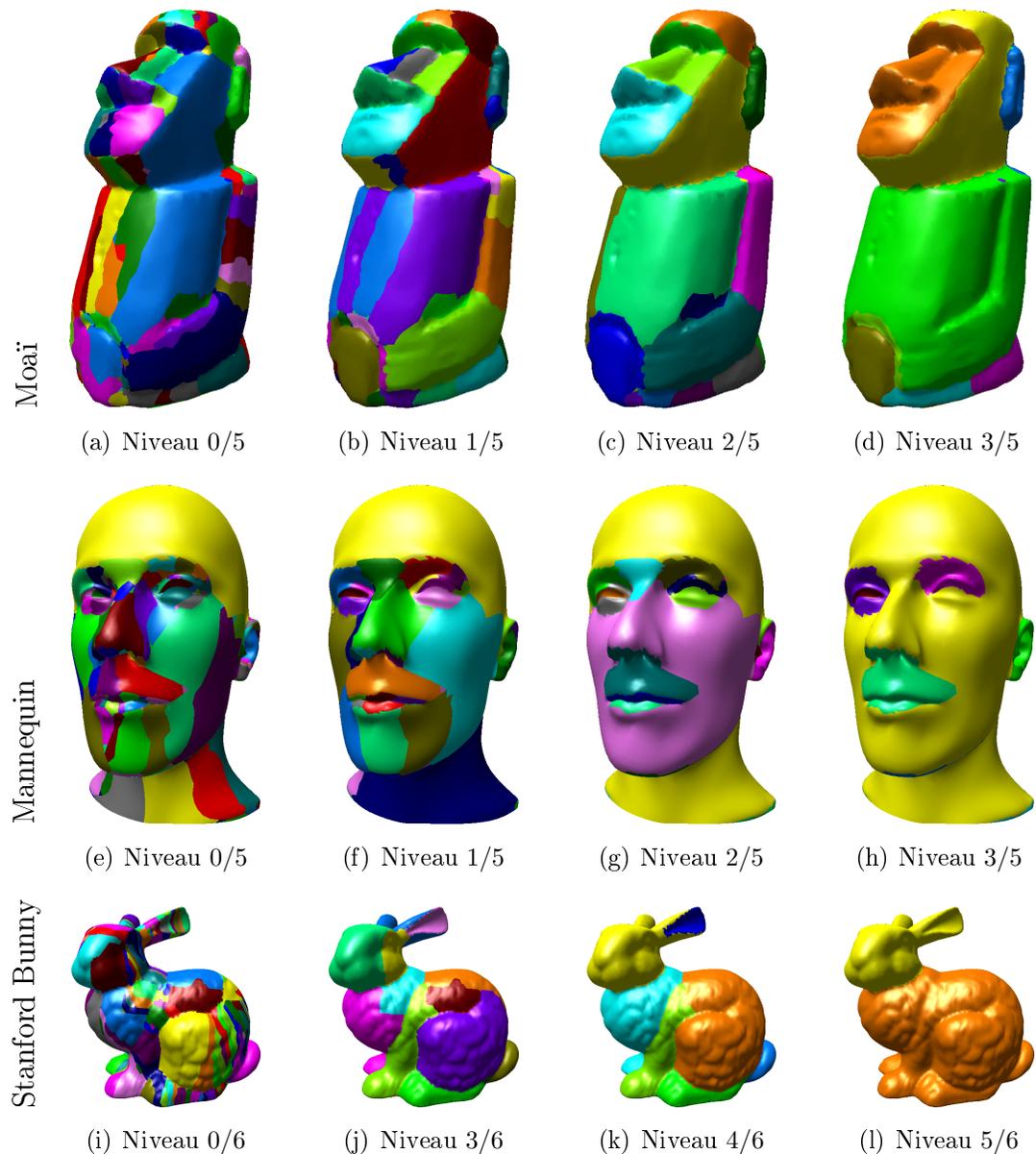


FIG. 5.5 – Segmentation à partir des cascades et de la profondeur de la LPE.

### 5.1.3 Les dynamiques de contour

Pour obtenir une caractérisation des frontières de manière moins locale que celle fournie par la profondeur de la LPE, nous avons orienté nos recherches vers les dynamiques de contour. Le principe général a été abordé à la section 3.3.3 ; il repose sur la recherche de la hauteur qu'il est nécessaire de grimper, en partant d'un minimum de bassin, pour atteindre une minimum plus faible. La dynamique d'un arc peut se définir comme la valeur maximale du seuil pour lequel cet arc subsiste lorsque tous les bassins ayant

une dynamique inférieure au seuil sont fusionnés. L'annexe A.4 propose un exemple de construction des dynamiques de contour ainsi que le seuillage effectué à chaque niveau de ces dynamiques. La figure 5.7 montre différents modèles segmentés à partir des cascades et des dynamiques de contour. La fonction de hauteur correspond à la distance aux lignes de crêtes. Son paramétrage diffère des cascades, c'est la raison pour laquelle les partitions obtenues avec la LPE seule (niveau 0) ne comptent pas le même nombre de régions. Les dynamiques de contour mettent en valeurs les contours les plus significatifs, il en résulte en moyenne un nombre moins important de niveaux de segmentation. Par exemple, pour les cascades seules, les modèles « Moaï » et « Mannequin » disposaient de 5 niveaux de segmentation. Dans le cas des dynamiques de contour, il n'en existe plus que 4 (voir tableau 5.3). Un comparatif des niveaux de segmentation obtenus à partir des différentes méthodes de fusion est proposé à la figure 5.2(c). La partition d'origine est présentée à la figure 5.6 et les seules caractéristiques utilisées pour la fusion sont la courbure minimum des bassins ainsi que la courbure des points selles. Les deux premières figures montrent les différents seuillages des critères ; la dernière figure correspond à la fusion réalisée par les cascades.

La segmentation concernant le modèle « Moaï » (figure 5.7(c)) n'est pas aussi efficace que dans le cas des cascades seules (figure 5.5(c)). Le corps est séparé en deux au niveau de segmentation 2/4. Au niveau suivant, trop de régions ont fusionné. Les modèles « Mannequin » et « Stanford Bunny » sont en revanche mieux segmentés avec les dynamiques de contour. Les principaux composants du visage du modèle « Mannequin » ont été repérés et la segmentation effectuée sur le modèle « Stanford Bunny » offre plus de régions significatives.

Modèles	Longueur des lignes (%)	Nombre de régions par niveau							
		0	1	2	3	4	5	6	
Mannequin	90	204	80	30	21	1	-	-	
Moaï	30	168	70	26	8	1	-	-	
Stanford Bunny	80	357	155	58	19	6	2	1	
Niveau		0	1	2	3	4	5	6	

TAB. 5.3 – Segmentations de plusieurs modèles réalisées à partir des cascades, des dynamiques de contour et de la fonction de hauteur relative à la distance aux lignes de crêtes.

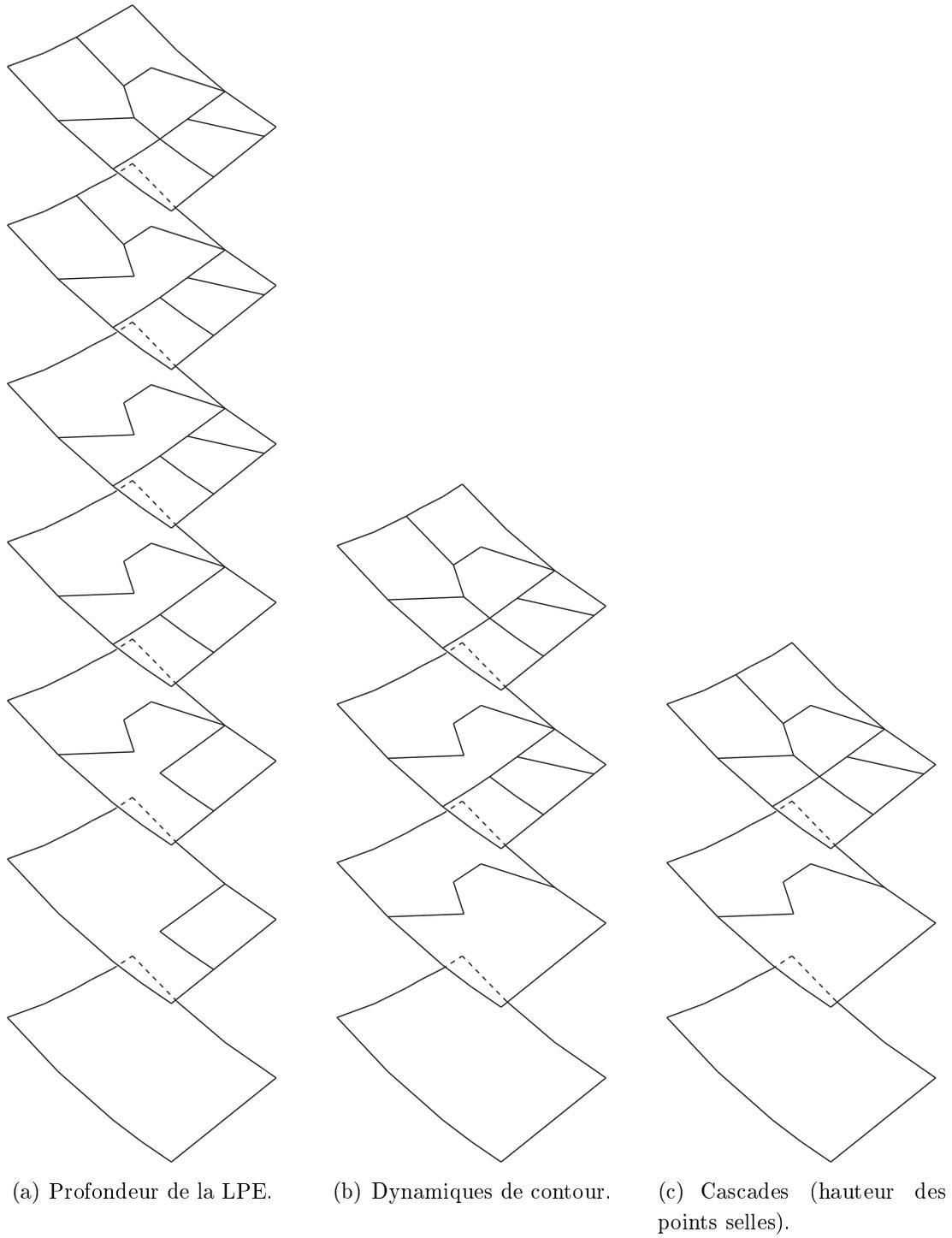


FIG. 5.6 – Niveaux de segmentation générés à partir des méthodes de fusion.

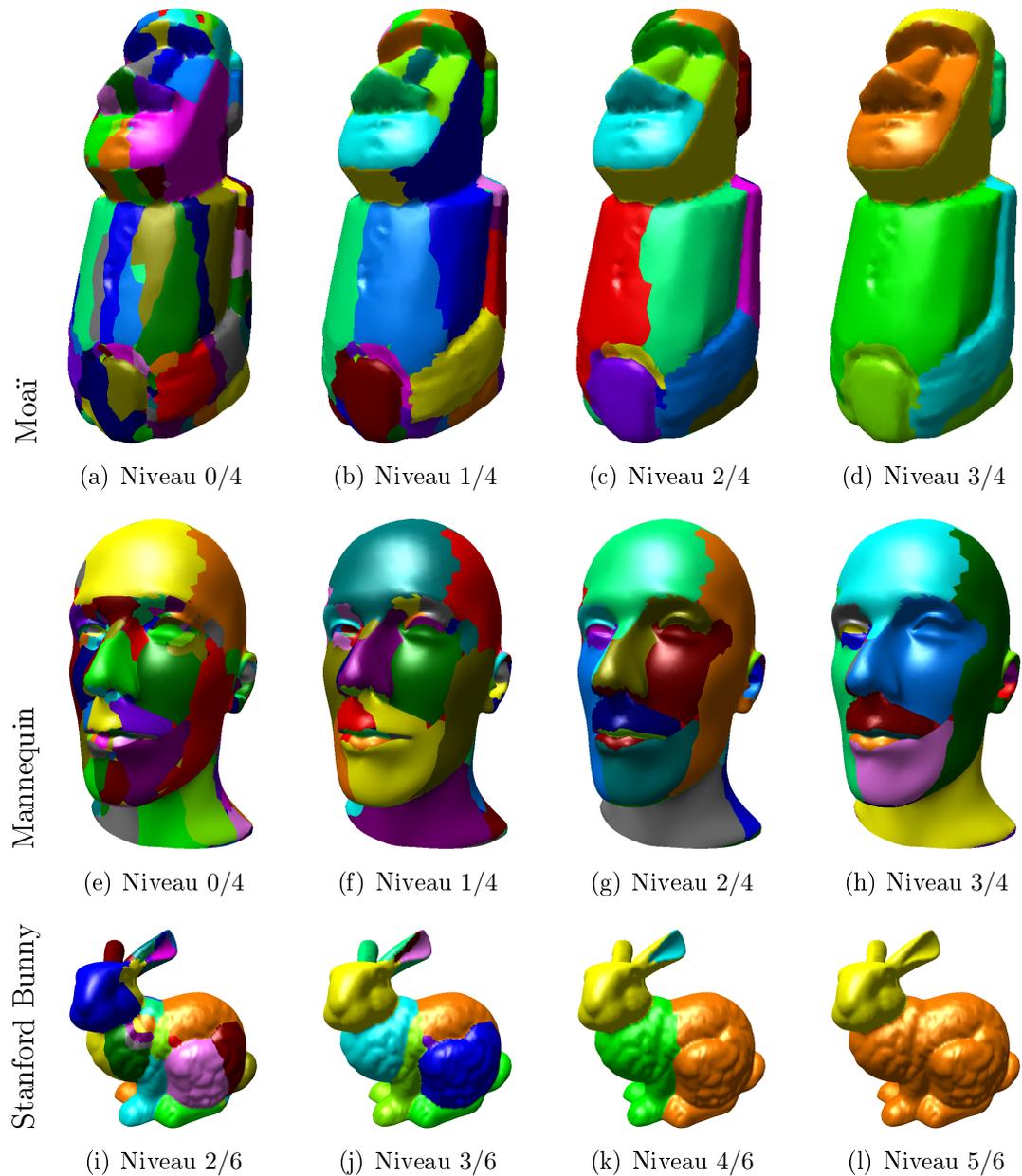


FIG. 5.7 – Segmentation à partir des cascades et des dynamiques de contour.

#### 5.1.4 Les paramètres

Les méthodes de segmentation hiérarchique que nous proposons disposent d'un faible nombre de paramètres à régler. Le principal paramètre correspond au numéro du niveau de la segmentation. Tous les niveaux de segmentation sont stockés dans un arbre à partir duquel il est facile de composer une partition une fois le niveau choisi. La figure 5.8 représente l'interface de sélection du niveau de segmentation.

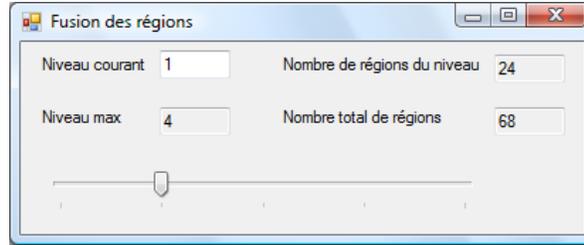


FIG. 5.8 – Sélection du niveau de segmentation.

Les lignes de crêtes calculées à partir de la méthode de [Yoshizawa *et al.*, 2005] ne sont pas toutes significatives. Il peut être intéressant de laisser à l'utilisateur le choix du nombre de lignes à garder, ou bien d'appliquer un filtre à partir de la longueur des lignes de crêtes. Dans notre application, nous avons retenu le filtre relatif à la longueur des lignes.

Dans le cas de la fonction de hauteur correspondant à la distance aux lignes de crêtes, les vertex définis comme sources d'inondation correspondent aux derniers vertex atteints localement par la propagation des distances. Par rapport à l'algorithme 11 (page 125), un vertex *Bande étroite* ayant tous ses voisins labellisés comme *Définitif* sera considéré comme source d'inondation. Il peut arriver que plusieurs de ces points soient relativement proches, ce qui amène à des problèmes de régions non significatives et de sur-segmentation. Nous avons défini une condition supplémentaire à la création d'une source d'inondation : un vertex pourra être défini comme source d'inondation (marqueur) s'il n'existe pas d'autre source dans un certain voisinage. Nous avons déterminé expérimentalement la valeur 3 comme degré de voisinage suffisant pour la plupart des modèles.

## 5.2 La génération automatique de marqueurs pour la LPE 3D

Lorsque certaines parties du modèle 3D sont partiellement localisées, l'utilisation des marqueurs est à privilégier. Ils représentent les nouvelles sources d'inondation pour la LPE. Nous avons proposé dans [Delest *et al.*, 2006c] et [Delest *et al.*, 2007a] une méthode de génération automatique de marqueurs pour la LPE sur les maillages polygonaux. Cette méthode correspond à la segmentation en parties significatives du modèle à partir de la topologie de son squelette. Le domaine d'application de cette segmentation est limité aux modèles disposant d'un squelette significatif comme les objets 3D de type « humain », « animal » ou « tubulaire ». Notre méthode procède à la création

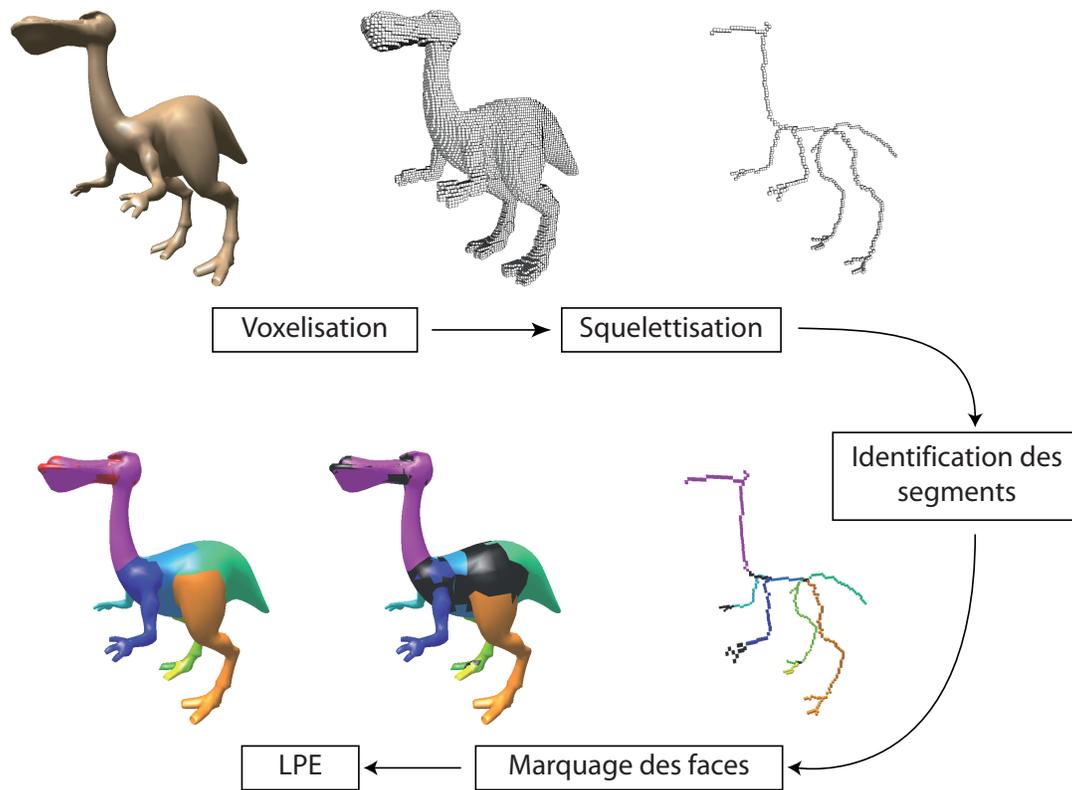


FIG. 5.9 – La génération automatique de marqueurs pour la LPE 3D.

des marqueurs à partir des étapes illustrées à la figure 5.9 : la voxelisation du maillage polygonal pour obtenir un volume 3D, le calcul du squelette par amincissement topologique, l'identification des principaux segments du squelette et enfin le marquage des faces à partir des différents segments du squelette. La LPE par FAH est ensuite utilisée avec les marqueurs générés automatiquement pour finaliser la segmentation.

### 5.2.1 La voxelisation

Notre méthode de calcul du squelette du maillage polygonal utilise la voxelisation puis l'amincissement topologique. La voxelisation permet la transformation d'un maillage polygonal en image 3D d'une certaine résolution où un élément de volume (voxel) prendra une valeur de 1 s'il appartient à l'objet et 0 sinon. Nous nous sommes orientés vers les travaux de [Karabassi *et al.*, 1999] pour calculer rapidement la voxelisation d'un objet 3D. L'algorithme permet d'obtenir directement le volume d'un objet 3D à partir de *Z-buffers* placés suivants les six principales directions. Les avantages de la méthode sont la simplicité de mise en œuvre ainsi que la possibilité d'utiliser les informations du *Z-buffer* calculées par la carte graphique de l'ordinateur. Les six plans présentés à

la figure 5.10 capturent les « pixels » les plus proches calculés par le *Z-buffer*. Les six représentations de ces plans (figure 5.11) permettent de savoir si un voxel est à l'intérieur ou à l'extérieur d'un objet. Parce qu'un lien doit être établi entre une face et un voxel de surface pour le procédé de marquage (voir section 5.2.3), nous avons procédé à une simulation du *Z-buffer* et n'avons pas utilisé directement les informations de la carte graphique. L'utilisation de la méthode de [Karabassi *et al.*, 1999] est ici motivée par la création directe des trois matrices de stockage (voir figure 5.12) nécessaires à notre procédé de squelettisation. Les six *Z-buffers*, même simulés, sont obtenus rapidement et permettent, pour chacune des trois principales directions, de calculer simplement la composition de la matrice de stockage associée et d'offrir une voxelisation correcte pour les modèles 3D de test généralement utilisés (voir annexe C). Pour générer un volume qui prend en compte les parties cachées, la méthode de [Passalis *et al.*, 2004] peut être utilisée.

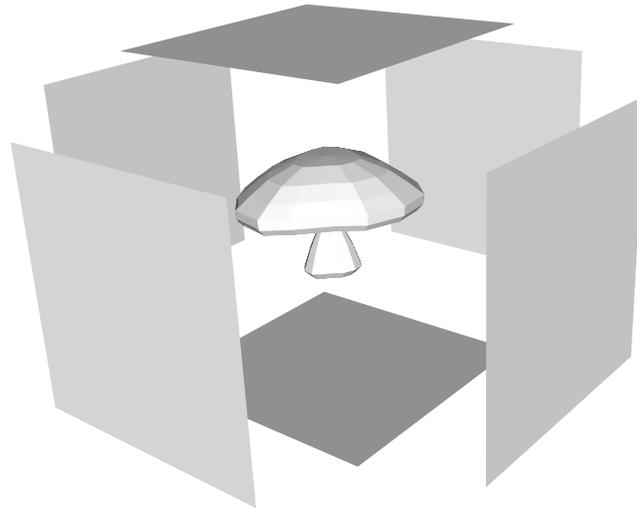


FIG. 5.10 – Les six *Z-buffers*.

Pour définir l'image 3D, l'utilisateur choisit la résolution (le nombre de voxels) de la plus grande dimension de la boîte englobante du maillage. Les autres dimensions sont proportionnellement ajustées. Les profondeurs minimum et maximum de chaque « pixel » des *Z-buffers* correspondent respectivement au premier et au dernier contacts avec l'objet. Ces profondeurs se définissent par  $Z_{\min}(X, Y)$ ,  $Z_{\max}(X, Y)$ ,  $Y_{\min}(X, Z)$ ,  $Y_{\max}(X, Z)$ ,  $X_{\min}(Z, Y)$  et  $X_{\max}(Z, Y)$ . Un voxel  $i$  appartient à l'objet s'il réunit les conditions suivantes :

$$Z_{\min}(X, Y) \leq z_i \leq Z_{\max}(X, Y) \quad (5.1)$$

$$Y_{\min}(X, Z) \leq y_i \leq Y_{\max}(X, Z) \quad (5.2)$$

$$X_{\min}(Z, Y) \leq x_i \leq X_{\max}(Z, Y) \quad (5.3)$$

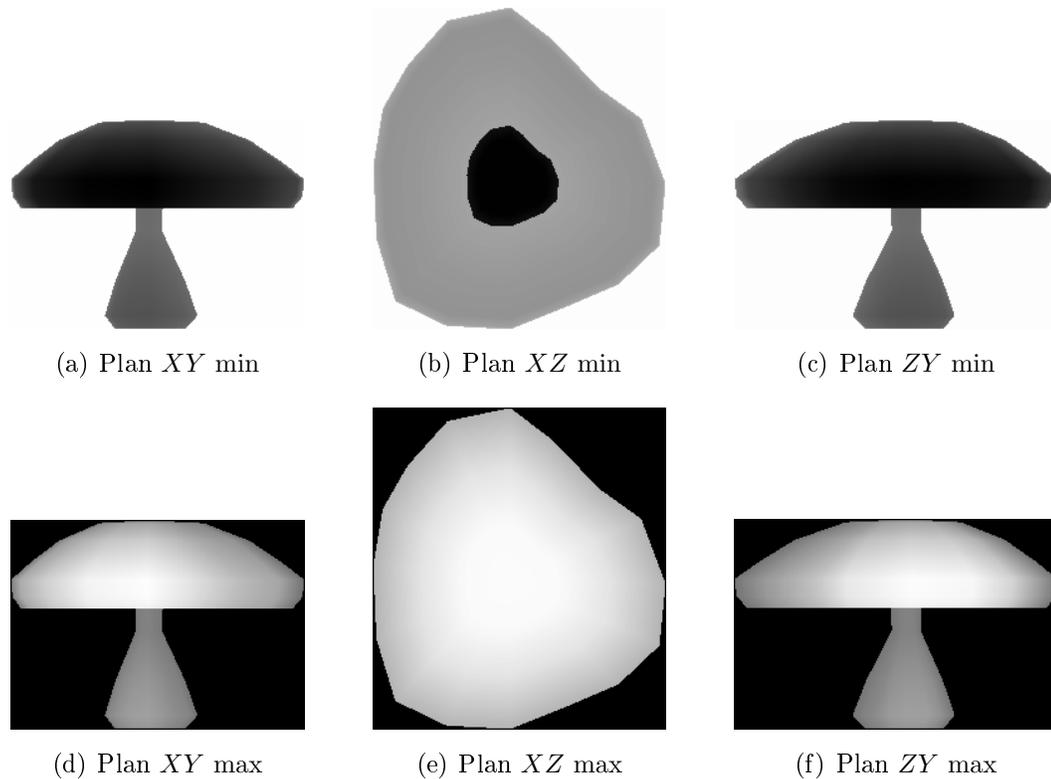
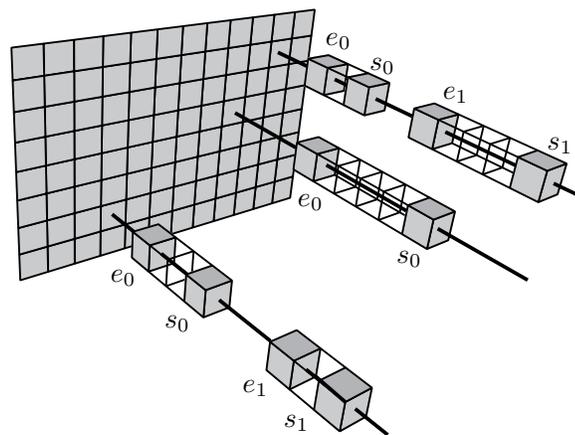


FIG. 5.11 – Image de profondeur des six plans.

Le stockage des voxels est réalisé à partir d'une matrice (figure 5.12) contenant pour chaque emplacement une liste de couples d'entrée / sortie  $\{e_i, s_i\}$  indiquant la profondeur à laquelle un « rayon » entre dans l'objet et celle où il en sort. Ce type de stockage permet de réduire considérablement la taille de la mémoire pour représenter un volume en 3D et offre un accès direct aux voxels appartenant à la surface de l'objet.

FIG. 5.12 – Matrice contenant les couples d'entrée / sortie  $\{e_i, s_i\}$  dans l'objet.

Nous avons laissé le soin à l'utilisateur de choisir la « résolution » de l'image 3D dans laquelle sera présenté l'objet discrétisé. La figure 5.13 donne le résultat de la voxelisation d'un modèle 3D à partir de différentes résolutions  $R$ . Nous avons pu déterminer expérimentalement qu'une résolution comprise entre 60 et 130 était suffisante pour obtenir le squelette de l'objet.

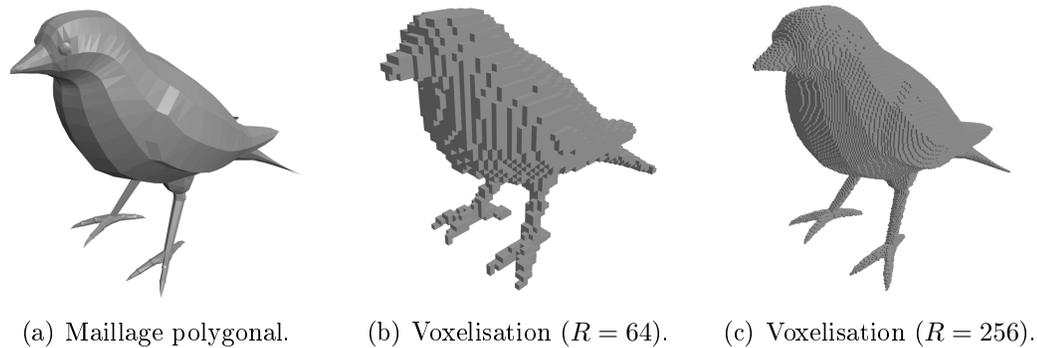


FIG. 5.13 – Voxelisation d'un objet 3D.

L'algorithme de [Karabassi *et al.*, 1999] est très rapide mais présente l'inconvénient de ne pas traiter les faces cachées. La figure 5.14 indique les limites de cette méthode : une partie intérieure de la sphère est inaccessible à partir des six plans et est ainsi considérée comme partie pleine de l'objet. [Passalis *et al.*, 2004] ont repris la méthode de Karabassi *et al.* utilisant l'accélération matérielle graphique de l'ordinateur pour réaliser la voxelisation et ont proposé une amélioration de l'algorithme en faisant intervenir un *Z-buffer* supplémentaire par direction ainsi qu'un *stencil buffer* par paire de directions opposées. Multiplier le nombre de *Z-buffer* permet de valider plus efficacement l'appartenance d'un voxel à l'objet.

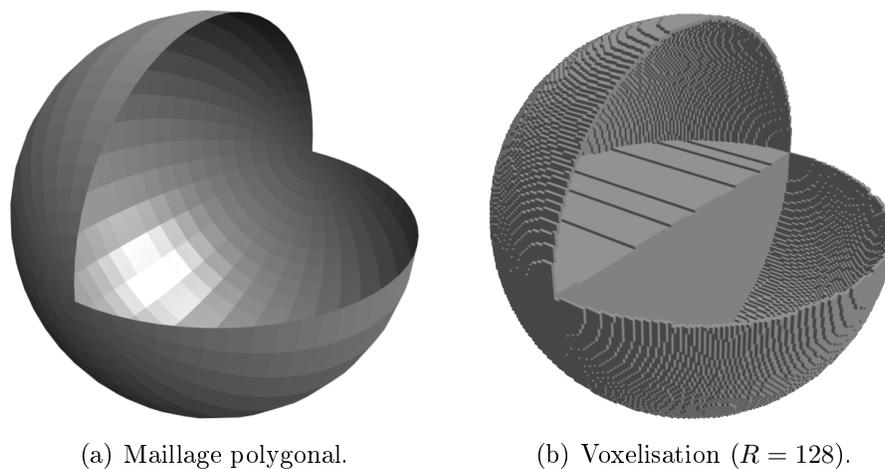


FIG. 5.14 – Limites de la méthode de [Karabassi *et al.*, 1999].

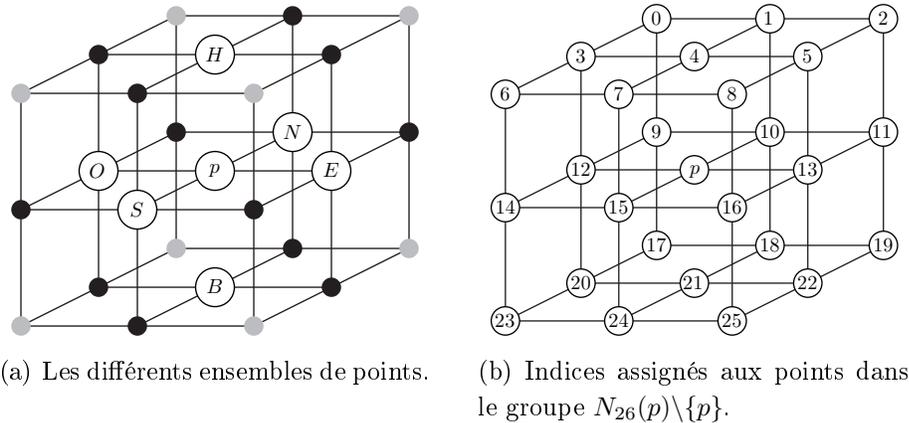
### 5.2.2 La squelettisation

La deuxième étape du procédé de création des marqueurs correspond à l'extraction du squelette de l'objet 3D. Les méthodes qui permettent de déterminer le squelette ont été abordées aux sections 2.4.5 et 2.4.6. L'approche par amincissement topologique de l'objet a été retenue car l'étape de squelettisation permet d'établir un lien entre les voxels de la surface et ceux du squelette. Ces liens sont nécessaires au procédé de marquage que nous verrons à la section suivante. Pour réaliser la squelettisation, nous avons utilisé la méthode de [Palágyi *et al.*, 2001] basée sur la suppression successive des « points simples » de l'objet. Cet algorithme enlève successivement les voxels dans l'image 3D selon certaines contraintes géométriques. Pour réaliser un amincissement symétrique, six érosions sont successivement appliquées sur les voxels de surface dans les directions *Haut*, *Bas*, *Nord*, *Sud*, *Est* et *Ouest*.

#### Définitions

Soit  $p$  un point (voxel) de l'espace discret  $\mathbb{Z}^3$ .  $N_j(p)$  (pour  $j = 6, 18, 26$ ) est défini comme l'ensemble des points  $j$ -adjacents au point  $p$ . La figure 5.15(a) représente les différents groupes inclus dans l'ensemble  $N_{26}(p)$  composé du point  $p$  et de ses 26 voisins. Le groupe  $N_6(p)$  contient le point central  $p$  et les six points marqués  $H$ ,  $B$ ,  $N$ ,  $S$ ,  $E$  et  $O$ . Le groupe  $N_{18}(p)$  contient le groupe  $N_6(p)$  et les 12 points noirs. Le groupe  $N_{26}(p)$  contient le groupe  $N_{18}(p)$  et les 8 points gris. La séquence des points distincts  $\langle x_0, x_1, \dots, x_n \rangle$  est un  $j$ -chemin de longueur  $n \geq 0$  du point  $x_0$  au point  $x_n$  dans un ensemble non vide  $X$  de points si chaque point de la séquence est dans  $X$  et que  $x_i$  est  $j$ -adjacent à  $x_{i-1}$  pour  $1 \leq i \leq n$ . Deux points sont  $j$ -adjacents dans l'ensemble  $X$  s'il existe un  $j$ -chemin dans  $X$  entre eux. Un ensemble  $X$  de points est  $j$ -connecté dans l'ensemble de points  $Y \supseteq X$  si au moins deux points dans  $X$  sont  $j$ -connectés dans  $Y$ .  $(m, n)$  est défini comme la *connectivité choisie* pour l'image ; le cas  $(26, 6)$  sera uniquement traité car il est suffisant pour la méthode de squelettisation.

L'image 3D binaire  $(m, n)$  est un quadruplet  $P = (\mathbb{Z}^3, m, n, B)$ . Chaque élément de  $\mathbb{Z}^3$  est appelé un *point* de  $P$ . Chaque point dans  $B \subseteq \mathbb{Z}^3$  est appelé un *point noir* (voxel appartenant à l'objet) et une valeur de 1 lui est attribuée. Les points de  $\mathbb{Z}^3 \setminus B$  sont appelés des *points blancs* (voxels en dehors de l'objet) et une valeur de 0 leur est attribuée.  $m$  désigne une continuité de points noirs et  $n$  une continuité de points blancs. Un ensemble noir (un objet) correspond ainsi à un ensemble maximal de points  $m$ -connectés dans  $B$  et un ensemble blanc à un ensemble maximal de points  $n$ -connectés dans  $\mathbb{Z}^3 \setminus B$ .

FIG. 5.15 – Ensembles et numéro des points dans  $N_{26}(p) \setminus \{p\}$ .

### Point simple

Un point noir dans  $(26, 6)$  est appelé point de bord s'il est au moins 6-*adjacent* à un point blanc. Une extrémité correspond à un point noir ayant exactement un voisin noir parmi ses 26 voisins. Un point  $p$  de l'objet est appelé point simple si sa suppression ne modifie pas la topologie de l'objet, c'est-à-dire si le nombre de composantes connexes et le nombre de trous de l'objet et de son complémentaire, dans le voisinage  $N_{26}(p)$ , restent inchangés après la suppression de  $p$ . Le point  $p$  est simple s'il réunit les conditions suivantes :

1. Le point  $p$  ne doit pas être un point isolé ou extrémité :  $N_{26}(p) \setminus \{p\} \cap (B \setminus \{p\})$  contient au moins 2 points.
2. Les voisins noirs dans le groupe  $N_{26}(p) \setminus \{p\}$  sont 26-*connectés* à ce même groupe. Le nombre de composantes connexes doit rester le même.
3. Le point noir  $p$  est 6-*adjacent* à un point blanc. C'est un point de bord :  $(\mathbb{Z}^3 \setminus B) \cap N_6(p) \neq \emptyset$ .
4. Les voisins blancs dans le groupe  $N_6(p) \setminus \{p\}$  sont 6-*connectés* au groupe de points blancs  $N_{18}(p) \setminus \{p\}$ .

L'algorithme de [Palágyi *et al.*, 2001] réalise, de façon séquentielle, la suppression des points simples pour chacune des six directions. A chaque érosion, seuls les voxels directement visibles à partir de la direction donnée sont testés ; si ceux-ci peuvent être enlevés sans que leur suppression ne modifie la topologie de l'objet, alors ils sont rangés dans une liste sans être encore retirés et sont considérés comme points simples potentiels. Lorsque tous les voxels de la direction donnée ont été testés, les points simples de la liste sont supprimés si leur simplicité n'a pas été affectée pas la suppression des autres points simples.

---

**Fonction** COND\_2\_SATISFAITE( $Np$ )

---

```

début
   $label \leftarrow 0$ 
   $lst \leftarrow$  nouvelle liste vide
  pour  $i \leftarrow 0$  à 25 faire  $L[i] \leftarrow 0$ 
  si  $Np[0] = 1$  alors
     $label \leftarrow 1$ 
     $L[0] \leftarrow label$ 
  pour  $i \leftarrow 1$  à 25 faire
    si  $Np[i] = 1$  alors
       $label \leftarrow label + 1$ 
       $L[i] \leftarrow label$ 
      pour chaque  $j \in S26[i]$  faire
        si  $L[j] > 0$  alors
          pour  $k \leftarrow 0$  à  $i - 1$  faire
            si  $L[k] = L[j]$  alors  $Insert(lst, k)$ 
          tant que  $lst \neq \emptyset$  faire
             $l \leftarrow Retire(lst)$ 
             $L[l] \leftarrow label$ 
      pour  $i \leftarrow 0$  à 25 faire
        si  $Np[i] = 1$  et  $L[i] \neq label$  alors
          retourner [FAUX]
      retourner [VRAI]
fin

```

---

L'algorithme de squelettisation fait intervenir une fonction qui réalise la suppression successive des points simples suivant l'ordre *Haut*, *Bas*, *Nord*, *Sud*, *Est* et *Ouest* jusqu'à l'obtention du squelette. A chaque itération, seuls les voxels de surface par rapport à la direction donnée sont traités, ce qui valide la condition 3; ces voxels ne doivent pas être isolés ou extrémités pour valider la condition 1. Les conditions 2 et 4 peuvent alors être testées suivant les algorithmes COND\_2\_SATISFAITE et COND\_4\_SATISFAITE. Ces algorithmes sont extraits de [Palágyi *et al.*, 2001] et nous les avons corrigés dans [Delest *et al.*, 2006c] car la phase de labellisation n'était pas complète.

La fonction COND\_2\_SATISFAITE utilise deux structures de données auxiliaires : la première correspond au tableau d'entiers  $L$ , où  $L[i]$  stocke les labels assignés aux éléments représentés par  $Np[i]$  ( $i = 0, \dots, 25$ ). La seconde est la clé du processus de

labellisation :  $S26$  est un tableau d'indice, où  $S26[i] = \{j | j \in N_{26}[i] \text{ et } 0 \leq j < i\}$  ( $i = 0, \dots, 25$ ). On aura ainsi  $S26[0] = \emptyset$ ,  $S26[1] = \{0\}$ ,  $\dots$ ,  $S26[25] = \{13, 15, 16, 21, 22, 24\}$  (voir fig. 5.15(b)). Tous les groupes  $S26[0], \dots, S26[25]$  peuvent être stockés dans un tableau prédéfini (voir annexe B). Les voisins noirs du point  $p$  sont 26-connectés si le même label est attribué à chacun des voisins noirs de  $p$ .

La fonction `COND_4_SATISFAITE` utilise les mêmes principes mais cette fois-ci, ce sont les connexions entre points blancs qui sont analysées et ces points, dans le groupe  $N_6(p)$ , doivent être 6-connectés au groupe de points blancs  $N_{18}(p)$ . Les voisins 6-adjacents ont les numéros 4, 10, 12, 13, 15 et 21 dans la figure 5.15(b). La clé de labellisation est définie en annexe au tableau B.2. La liste  $N18$  des points blancs de  $N_{18}(p)$  apparaît en annexe au tableau B.3. Il est à remarquer que pour avoir une connexion cohérente, les points ne peuvent pas rester dans l'ordre croissant.

---

**Fonction** `COND_4_SATISFAITE( $Np$ )`


---

**début**

```

    label ← 0
    lst ← nouvelle liste vide
    pour i ← 0 à 25 faire L[i] ← 0
    pour i ← 0 à 17 faire
        indice ← N18[i]
        si Np[indice] = 0 alors
            label ← label + 1
            L[indice] ← label
            pour chaque j ∈ N18[i] faire
                si L[j] > 0 alors
                    pour k ← 0 à i faire
                        si L[N18[k]] = L[j] alors Insert(lst, N18[k])
            tant que lst ≠ ∅ faire
                l ← Retire(lst)
                L[l] ← label
    pour i ← 0 à 5 faire
        indice ← N6[i]
        si Np[indice] = 0 et L[indice] ≠ label alors retourner [FAUX]
    retourner [VRAI]

```

**fin**


---

## La squelettisation

Nous apportons une variante à l'algorithme de [Palágyi *et al.*, 2001] en considérant trois sous-itérations et non plus six. Les modifications sont en rapport avec l'utilisation du procédé de voxelisation et la matrice de stockage des couples de points d'entrée/sortie dans l'objet (figure 5.12). Pour accéder de manière très rapide aux voxels de bord selon une direction donnée, nous utilisons trois matrices liées aux principales directions. Nous définissons *lstCouplesHB*, la liste des couples d'entrée/sortie pour la direction *Haut – Bas*, *lstCouplesNS*, la liste pour la direction *NORD – SUD* et *lstCouplesEO*, la liste pour la direction *EST – OUEST*. La matrice *Y* correspond à l'image 3D binaire. Il est possible de s'en passer mais elle a été conservée pour accéder directement aux 26 voisins d'un voxel. Elle n'est pas utilisée pour la recherche de voxels de bord comme c'est le cas dans l'algorithme de *Palágyi et al.*

---

### Procédure Amincissement(*Y*)

---

**début**

*modifié* ← 1

**tant que** *modifié* > 0 **faire**

*modifié* ← 0

*modifié* ← *modifié* + SOUSITER(*Y*, *lstCouplesHB*)

*modifié* ← *modifié* + SOUSITER(*Y*, *lstCouplesNS*)

*modifié* ← *modifié* + SOUSITER(*Y*, *lstCouplesEO*)

**fin**

---

La procédure Amincissement réalise plusieurs itérations de l'amincissement suivant les trois principales directions. Ce procédé de squelettisation est stoppé lorsque plus aucun voxel ne peut être enlevé. La fonction SOUSITER supprime les voxels de bord orientés suivant la direction donnée. La méthode est qualifiée de séquentielle car la simplicité n'est pas testée simultanément pour tous les points de bord et un biais peut exister par rapport à un voxel qui été considéré comme simple alors que cela n'était pas le cas. La figure 5.16 illustre les différentes itérations de l'amincissement sur le modèle « Bird ».

La méthode de squelettisation utilisée apporte de bons résultats mais peut être améliorée à partir de techniques offrant une suppression parallèle de points simples. Des études sur le sujet sont disponibles dans [Lohou, 2001][Manzanera *et al.*, 2002][Lohou et Bertrand, 2007].

---

**Fonction** SOUSITER( $Y, lstCouples$ )
 

---

**début** $modifié \leftarrow 0$  $lstPointsMin \leftarrow \emptyset$  $lstPointsMax \leftarrow \emptyset$ **pour chaque**  $couple \{e_i, s_i\} \in lstCouples$  **faire** $N_p \leftarrow COLLECTE\_26\_VOISINS(Y, e_i)$ **si**  $EST\_EXTREMITÉ(N_p) = FAUX$  **et**  $EST\_SIMPLE(N_p)$  **alors**   $\lfloor$  Insert( $lstPointsMin, e_i$ )**si**  $e_i \neq s_i$  **alors**   $N_p \leftarrow COLLECTE\_26\_VOISINS(Y, s_i)$   **si**  $EST\_EXTREMITÉ(N_p) = FAUX$  **et**  $EST\_SIMPLE(N_p)$  **alors**     $\lfloor$  Insert( $lstPointsMax, s_i$ )**tant que**  $lstPointsMin \neq \emptyset$  **faire**   $p \leftarrow Retire(lstPointsMin)$    $N_p \leftarrow COLLECTE\_26\_VOISINS(Y, p)$   **si**  $EST\_EXTREMITÉ(N_p) = FAUX$  **et**  $EST\_SIMPLE(N_p)$  **alors**     $\lfloor$  Insert( $lstPointsMin, p$ )**tant que**  $lstPointsMax \neq \emptyset$  **faire**   $p \leftarrow Retire(lstPointsMax)$    $N_p \leftarrow COLLECTE\_26\_VOISINS(Y, p)$   **si**  $EST\_EXTREMITÉ(N_p) = FAUX$  **et**  $EST\_SIMPLE(N_p)$  **alors**     $modifié \leftarrow modifié + 1$     MISE\_A\_VIDE( $Y, p$ )    MISE\_A\_VIDE( $lstCouplesHB, p$ )    MISE\_A\_VIDE( $lstCouplesNS, p$ )     $\lfloor$  MISE\_A\_VIDE( $lstCouplesEO, p$ )**retourner**  $modifié$ **fin**


---

**Fonction** EST\_SIMPLE( $N_p$ )
 

---

**début**  **si**  $COND\_2\_SATISFAITE(N_p)$  **alors**    **si**  $COND\_4\_SATISFAITE(N_p)$  **alors**       $\lfloor$  **retourner** [VRAI]  **retourner** [FAUX]**fin**

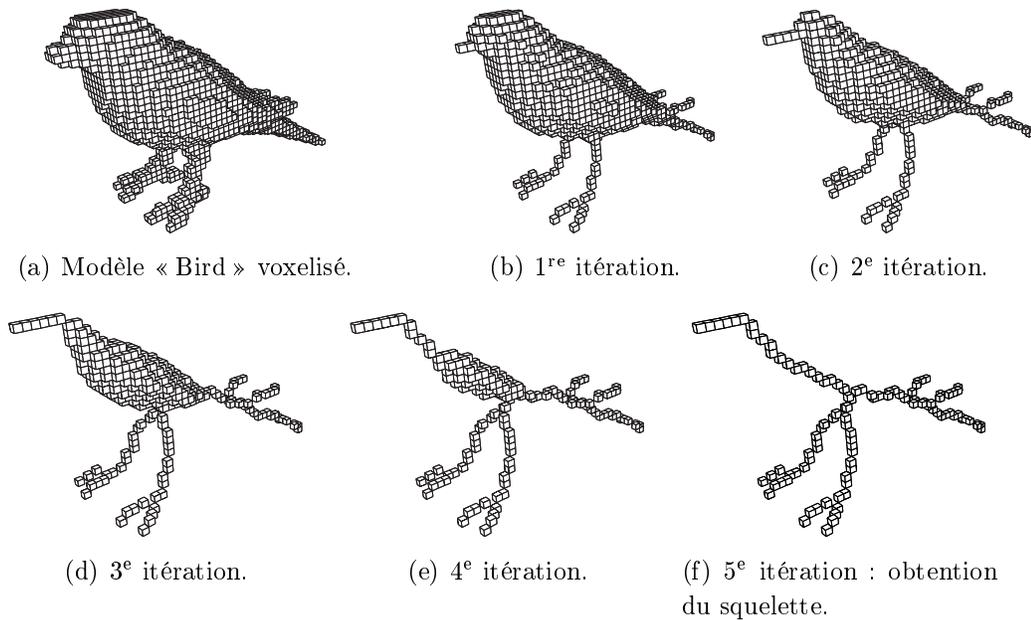


FIG. 5.16 – Différentes itérations du procédé de squelettisation.

### 5.2.3 Le marquage

En considérant le squelette du modèle comme un graphe, il apparaît deux principaux types d'éléments : les arcs et les sommets. Les arcs contiennent tous les voxels connectés à un ou deux autres voxels et les sommets correspondent aux voxels de jonction connectés à au moins trois autres voxels. La figure 5.17 résume les principales étapes de la segmentation à partir de la LPE et des marqueurs générés automatiquement. Dès lors que le squelette est obtenu, des labels différents sont attribués à chaque arc. Ces labels sont transmis à certaines faces du maillage qui deviennent « marqueurs » pour la LPE.

Pour réaliser la transmission des labels des voxels du squelette aux faces du maillage, une connexion est établie dès la voxelisation pour lier les faces aux voxels de surface puis lors de la squelettisation pour transmettre le lien aux voxels de couche inférieure jusqu'au squelette. La figure 5.18 illustre la transmission de ces liens. Plusieurs faces peuvent être liées au même voxel de surface. Chaque voxel de l'objet contient une liste de faces qu'il transmet aux voxels de couche inférieure. Les voxels du squelette contiennent ainsi plusieurs listes de faces auxquelles ils donnent leur label. Lorsqu'une face reçoit plusieurs labels différents, elle n'est pas étiquetée. Le procédé de segmentation par LPE utilise les faces marquées comme source d'inondation.

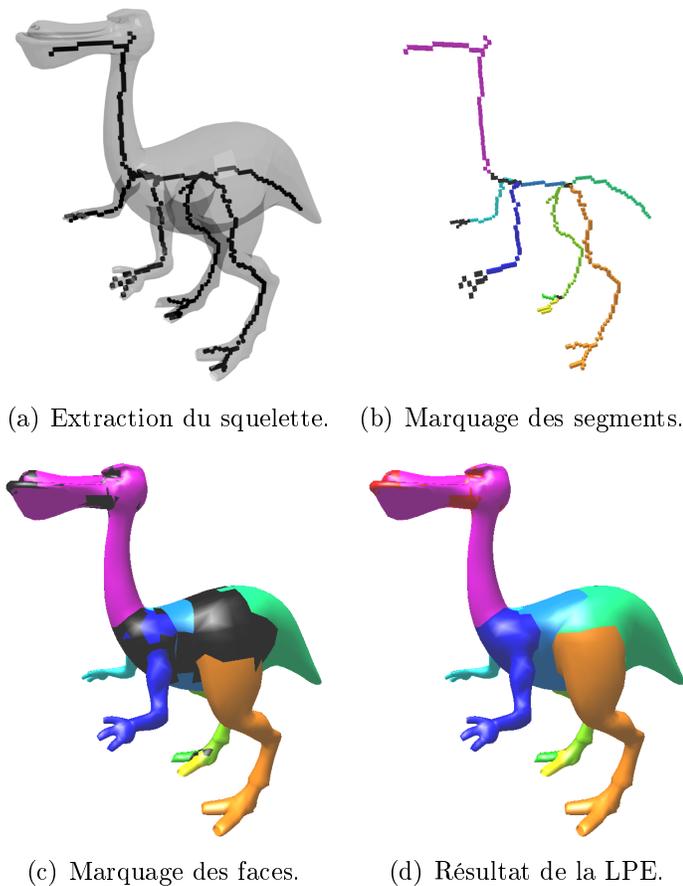


FIG. 5.17 – Résumé des étapes de la segmentation par LPE avec des marqueurs générés automatiquement à partir du squelette de l'objet.

Notre méthode de segmentation est relativement proche de celle proposées dans [Brunner et Brunnett, 2006]. Les deux méthodes, publiées à peu près à la même période, présentent des différences au niveau de la création de connexion entre la surface du maillage et les voxels de squelette. La méthode de Brunner et Brunnett lie ces voxels aux vertex du maillage et non plus aux faces. Un vertex n'est ainsi lié qu'à un voxel de surface, ce qui économise de la place mémoire. Une face peut être directement étiquetée si ses trois vertex disposent du même label. Pour réaliser la segmentation du maillage, les faces qui ont des vertex étiquetés différemment sont comparées à leurs faces voisines et obtiennent le label de celle qui leur ressemble le plus. Notre méthode utilise la LPE ainsi qu'une fonction de hauteur relative à la courbure pour positionner les frontières aux zones de fortes courbures. Ce type d'approche est à privilégier car il tient compte de la géométrie du maillage pour réaliser la segmentation finale. Notre segmentation par LPE utilise la courbure et nécessite donc une surface relativement propre. Le bruit sur la surface ne perturbe pas la construction du squelette mais affecte la création des contours. Lorsque la surface est bruitée, des méthodes de lissage [Botsch *et al.*, 2007]

peuvent être utilisées en pré-traitement. La coupe de graphe est une alternative à notre procédé de labellisation par LPE. Nos marqueurs définis automatiquement pourraient être considérés comme des couples (arrière-plan, avant-plan) pour les méthodes de [Zhao *et al.*, 2006] et [Ji *et al.*, 2006].

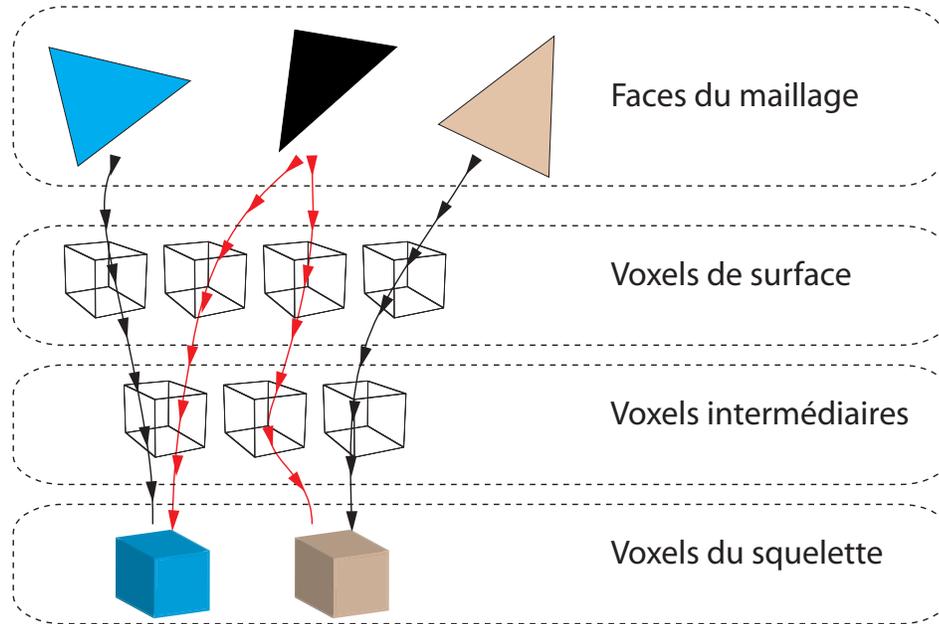


FIG. 5.18 – Création de liens entre les faces et les voxels du squelette.

#### 5.2.4 Les paramètres

Le principal paramètre de la méthode correspond au choix de la résolution de la voxelisation. Nos études expérimentales ont montré qu'une valeur de 100 conduisait généralement à de bons résultats. Une valeur trop faible ne permet pas d'obtenir une représentation satisfaisante de l'objet tandis qu'une valeur trop importante génère des segments non significatifs du squelette.

Pour supprimer les segments non significatifs, nous fixons la longueur minimale d'un segment à 5.

Les stratégies pour éviter la sur-segmentation abordées dans ce chapitre utilisent des méthodes de segmentation hiérarchique ainsi que des marqueurs définis à partir du squelette de la forme. La segmentation hiérarchique est basée sur le seuillage de la hauteur des frontières ou sur la fusion de régions à partir des cascades. Les caractéristiques de bases sont la hauteur des points selles et la courbure minimum des bassins. Elles

permettent de déterminer la hauteur des frontières qui correspondent à la courbure des points selles ou à la profondeur de la LPE ou encore à la dynamique de contour.

Les marqueurs repérés à partir du squelette définissent les principales régions du maillage et permettent au procédé de LPE, avec une fonction de hauteur relative à la courbure, de terminer la segmentation à partir d'informations géométriques de la surface.

Nous traitons dans le chapitre suivant des résultats de la segmentation issus des différentes fonctions de hauteur de la LPE 3D, de la segmentation hiérarchique ainsi que des marqueurs obtenus à partir du squelette de la forme. Les méthodes sont testées sur des modèles de formes très différentes comme des pièces mécaniques ou des objets de forme naturelle.



# Chapitre 6

## Résultats expérimentaux

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux des nouvelles méthodes de segmentation proposées. La stratégie d'évaluation de la segmentation de maillages polygonaux a été abordée à la section 2.2.2. Nous utilisons les critères d'évaluation proposés dans [Attene *et al.*, 2006b] qui correspondent au type de segmentation, à la justesse des régions et frontières obtenues, aux niveaux de segmentation disponibles, à la sensibilité à la pose de l'objet, à la complexité de l'algorithme ainsi qu'au nombre de paramètres de contrôle.

### 6.1 Évaluation des fonctions de hauteur de la LPE 3D

La fonction de hauteur est évaluée à partir du résultat global de la segmentation. Chaque expérimentation fait apparaître les trois principales étapes du procédé de segmentation qui sont le calcul de la fonction de hauteur, la segmentation par LPE puis la fusion de régions à partir de l'algorithme des cascades. Les fonctions de hauteur les plus significatives sont appliquées ; il s'agit de la norme de la matrice de covariance pour les vertex puis pour les faces, de la distance inverse aux lignes de crêtes puis de courbure absolue.

La figure 6.1 fait apparaître plusieurs segmentations du modèle « Fandisk » qui correspond à une pièce mécanique avec de nombreux angles vifs. Parmi les différentes fonctions de hauteur utilisées, la norme de la matrice de covariance pour les faces offre ici les résultats les plus significatifs. Le choix de la meilleure partition est réalisée selon un critère purement visuel. Le tableau 6.1 fait apparaître les différentes caractéristiques

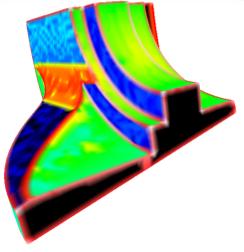
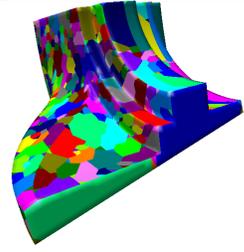
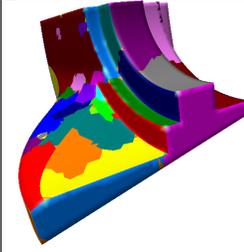
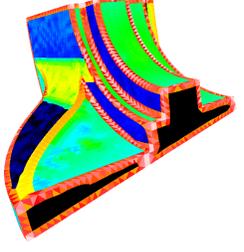
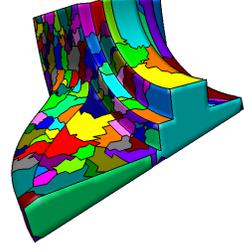
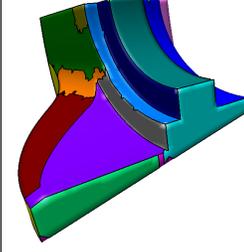
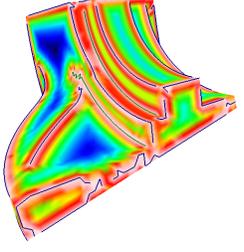
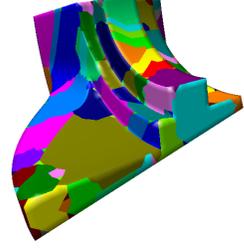
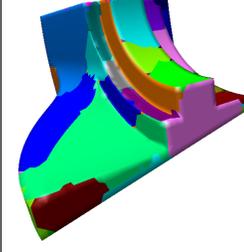
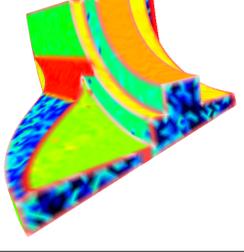
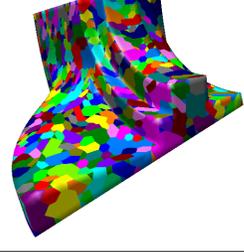
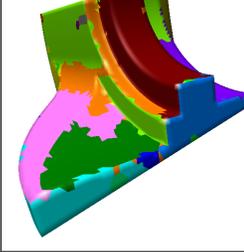
Méthodes	Fonction de hauteur	LPE	Segmentation hiérarchique
Norme (vertex)			
Norme (faces)			
Distance			
Courbure absolue			

FIG. 6.1 – Comparaison des fonctions de hauteur et des segmentations sur le modèle « Fandisk ».

des segmentations hiérarchiques retenues. Les cascades ont été utilisées pour créer plusieurs niveaux de segmentation avec les différentes fonctions de hauteur. La norme de la matrice de covariance ainsi que les cascades offrent six niveaux de segmentation et un nombre maximum de 237 régions. Le niveau 3 a été retenu ; il correspond à une segmentation en 17 régions.

Le temps de calcul de la segmentation dépend du calcul de la fonction de hauteur, de celui de la LPE et de la fusion réalisée par les cascades. La fonction de distance représente un temps de calcul important ; elle fait appel au procédé de caractérisation des lignes de crêtes proposé par [Yoshizawa *et al.*, 2005]. La courbure absolue ainsi que

Fonction de hauteur	Cascades		Temps de calcul (s)		
	Niveau	Régions	Fct. H	LPE + Fusion	Total
Norme (vertex)	2 / 5	60 / 367	0.3	1.1	1.4
Norme (Faces)	3 / 6	17 / 237	0.4	3.1	3.5
Distance	1 / 4	45 / 108	8.9	1.4	10.3
Courbure absolue	4 / 6	43 / 821	0.9	1.9	2.8

TAB. 6.1 – Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur le modèle « Fandisk ». Les lignes de crêtes au moins égales à 45% de la longueur maximale des lignes ont été utilisées pour la fonction de distance. Le modèle dispose de 6475 vertex et de 12946 faces.

la norme de la matrice de covariance pour les vertex sont calculées pour chaque vertex à partir d'un voisinage de vertex. La norme de la matrice de covariance pour les faces est calculée pour chaque face avec un voisinage de face. Le nombre de faces est environ deux fois supérieur au nombre de vertex et le voisinage de face est généralement plus important que celui de vertex ; il en résulte une complexité plus importante.

Les fonctions de hauteur de la figure 6.1 font apparaître des zones de courbures homogènes sur le maillage. Ce type de modèle est adapté aux procédés qui font intervenir la classification des courbures pour la segmentation [Lavoué *et al.*, 2004]. Notre approche diffère : les éléments ne sont pas regroupés par similarité de courbure mais par un procédé de croissance de régions simultanée (la LPE) à partir des vertex minima. Comme on peut le voir sur les figures représentant les partitions générées par la LPE, de nombreuses régions sont créées car il y a de multiples minima locaux sur la surface. Les cascades permettent de proposer rapidement plusieurs partitions à l'utilisateur.

Les lignes de crêtes sont ici bien identifiées mais leur positionnement contribue à la création de plusieurs minima à l'intérieur d'un carreau potentiel. La cause principale provient de l'alignement quasi parallèle de certaines frontières. Le front de propagation, qui démarre à partir des frontières alignées, se rencontre en de multiples endroits et génère plusieurs minima.

La fonction de distance inverse aux lignes de crêtes se révèle beaucoup plus efficace sur les modèles Moaï et Mannequin qui présentent plus de formes arrondies.

Fonction de hauteur	Cascades		Temps de calcul (s)		
	Niveau	Régions	Fct. H	LPE + Fusion	Total
Norme (vertex)	7 / 12	107 / 1109	0.5	3.5	3.5
Norme (Faces)	6 / 11	100 / 901	0.8	8.1	8.9
Distance	2 / 6	41 / 173	13.2	4.1	17.3
Courbure absolue	6 / 11	100 / 901	1.0	2.9	3.8

TAB. 6.2 – Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur le modèle « Moaï ». Les lignes de crêtes au moins égales à 80% de la longueur maximale des lignes ont été utilisées pour la fonction de distance. Le modèle dispose de 10002 vertex et de 20000 faces.

Fonction de hauteur	Cascades		Temps de calcul (s)		
	Niveau	Régions	Fct. H	LPE + Fusion	Total
Norme (vertex)	3 / 10	60 / 325	0.4	1.1	1.5
Norme (Faces)	5 / 10	28 / 259	0.3	3.7	4.0
Distance	1 / 5	61 / 156	7.7	1.5	9.2
Courbure absolue	4 / 9	58 / 335	0.7	1.1	1.8

TAB. 6.3 – Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur le modèle « Mannequin ». Les lignes de crêtes au moins égales à 50% de la longueur maximale des lignes ont été utilisées pour la fonction de distance. Le modèle dispose de 6743 vertex et de 13424 faces.

Les tableaux 6.2 et 6.3 proposent les caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur les modèles Moaï et Mannequin. Ces deux modèles ont un nombre plus élevé de vertex que le modèle Fandisk, il en résulte un nombre de minima potentiels plus important qui peut entraîner une hiérarchie de segmentations plus complexe. Pour ces deux modèles, la distance inverse aux lignes de crêtes représente la fonction de hauteur la plus efficace. Les différents carreaux obtenus à partir des cascades mettent en évidence les principales parties de ces modèles (figures 6.2 et 6.3).

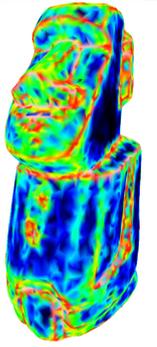
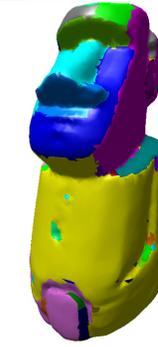
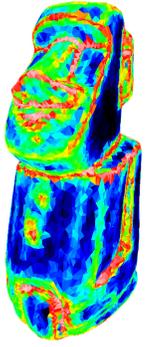
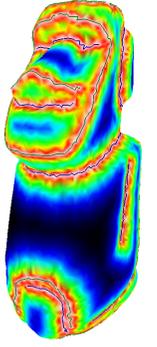
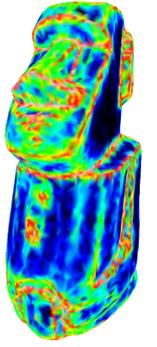
Méthodes	Fonction de hauteur	LPE	Segmentation hiérarchique
Norme (vertex)			
Norme (faces)			
Distance			
Courbure absolue			

FIG. 6.2 – Comparaison des fonctions de hauteur et des segmentations sur le modèle « Moai ».

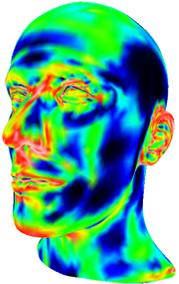
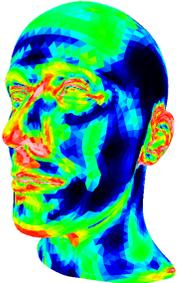
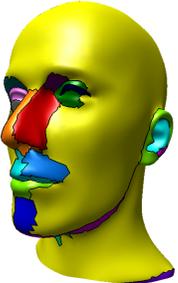
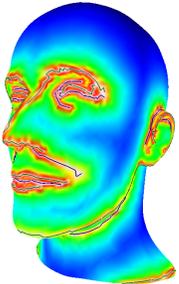
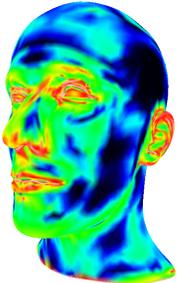
Méthodes	Fonction de hauteur	LPE	Segmentation hiérarchique
Norme (vertex)			
Norme (faces)			
Distance			
Courbure absolue			

FIG. 6.3 – Comparaison des fonctions de hauteur et des segmentations sur le modèle « Mannequin ».

## 6.2 Évaluation de la segmentation hiérarchique

Les méthodes de segmentation hiérarchique sont évaluées à partir de différents types de modèles ainsi que des fonctions de hauteur qui caractérisent le mieux les frontières de ces modèles.

Les modèles de type *visage* proposés à la figure 6.4 sont segmentés en parties significatives. Les carreaux peuvent être associés grossièrement à différentes parties du visage comme le front, les yeux, le nez, etc. Les temps de calcul sont directement dépendant du nombre de vertex ou de faces ainsi que de la fonction de hauteur utilisée. Le processus de fusion est plus rapide car il est lié au nombre de régions. Les lignes de crêtes dont la longueur dépasse 10% de la taille maximale de la plus grande ligne ont été utilisées pour la fonction de distance.

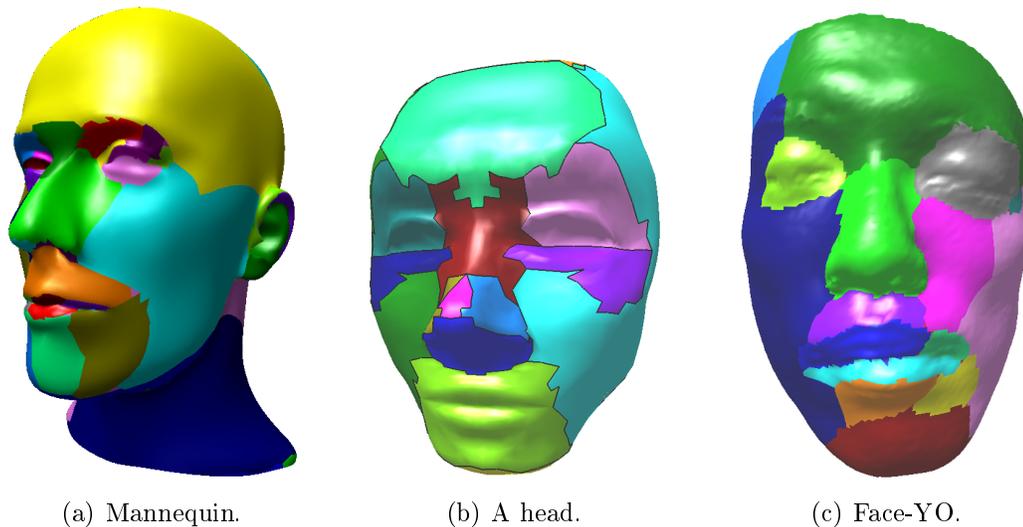


FIG. 6.4 – Segmentation hiérarchique sur des modèles de type « visage ».

Modèle	Fonction de hauteur	Cascades		Temps de calcul (s)			
		Niveau	Régions	LPE	Fusion	Fct. H	Total
A head (4640 faces)	norme (face)	2 / 4	16 / 130	0.34	0.16	0.28	0.78
Mannequin (6743 vertex)	distance (10%)	1 / 5	61 / 156	1.4	0.13	7.7	9.2
Face-YO (13746 vertex)	distance (10%)	2 / 5	18 / 129	7	0.02	21.3	28.3

TAB. 6.4 – Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur les modèles de type « visage ».

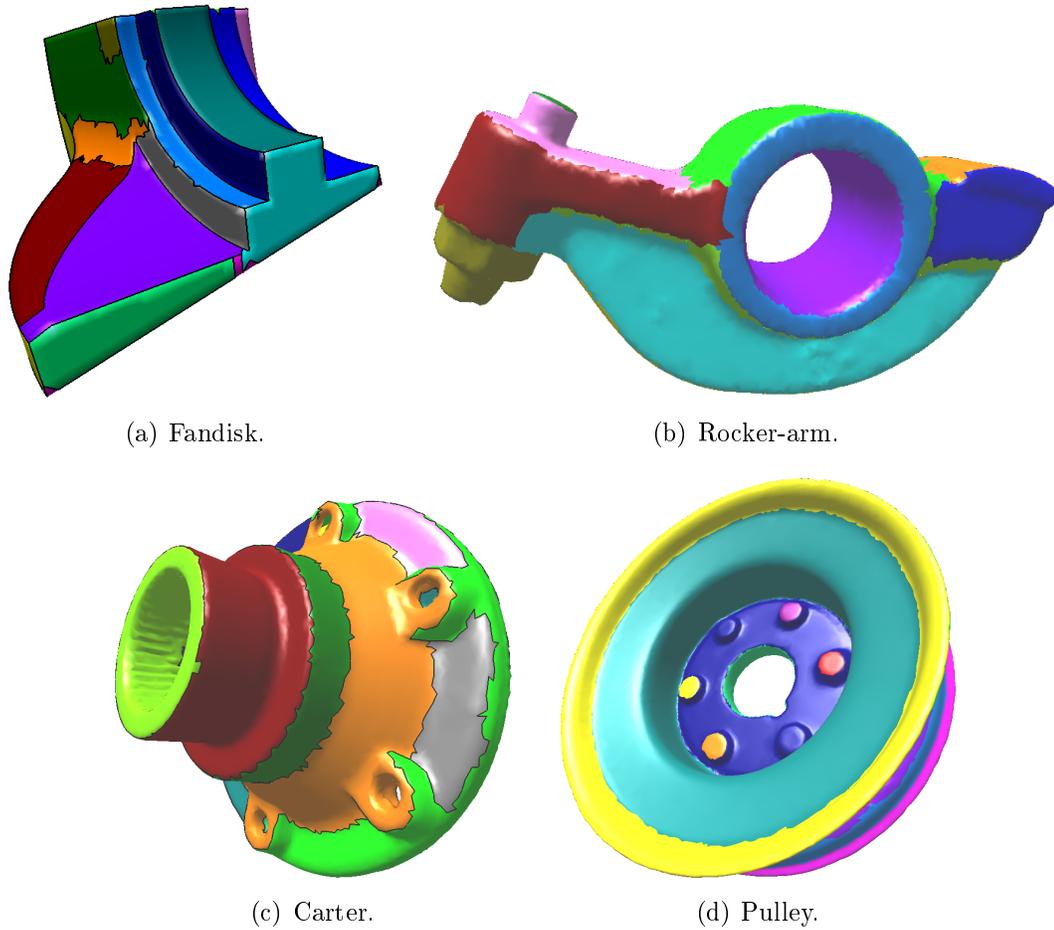


FIG. 6.5 – Segmentation hiérarchique sur des modèles de type « pièce mécanique ».

Modèle	Fonction de hauteur	Cascades		Temps de calcul (s)			
		Niveau	Régions	LPE	Fusion	Fct. H	Total
Fandisk (12946 faces)	norme (face)	3 / 6	17 / 237	3.1	0.13	0.42	3.6
Rocker-arm (10044 vertex)	distance (10%)	3 / 5	15 / 265	3.8	0.05	13.6	17.5
Carter (29171 faces)	norme (face)	4 / 6	17 / 992	16.2	0.5	0.8	17.5
Pulley (25482 vertex)	distance (0%)	4 / 6	22 / 1195	23.6	0.5	44.1	68.2

TAB. 6.5 – Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur les modèles de type « pièce mécanique ».

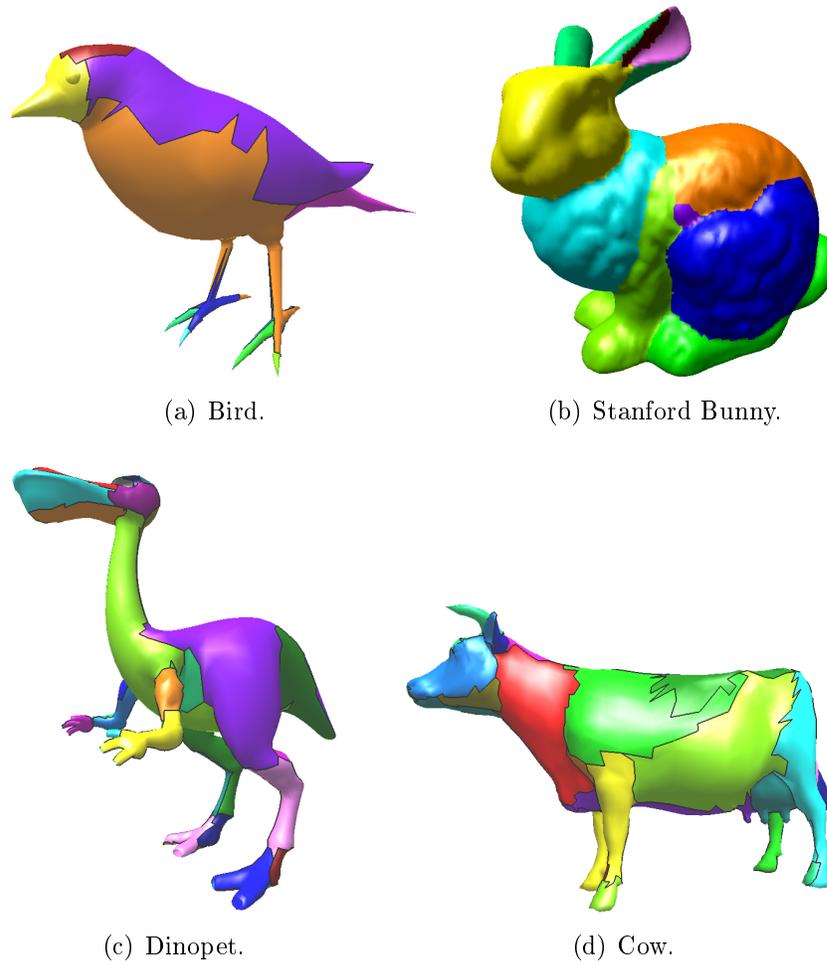


FIG. 6.6 – Segmentation hiérarchique sur des modèles de type « animal ».

Modèle	Fonction de hauteur	Cascades		Temps de calcul (s)			
		Niveau	Régions	LPE	Fusion	Fct. H	Total
Bird (2246 faces)	norme (face)	2 / 3	18 / 83	0.04	0.01	0.03	0.08
Cow (5804 faces)	norme (face)	2 / 4	36 / 193	0.33	0.02	0.1	0.45
Dinopet (6564 faces)	norme (face)	2 / 4	38 / 206	0.41	0.02	0.15	0.6
Stanford Bunny (34834 vertex)	Distance (20%)	3 / 6	19 / 357	51	0.12	52.2	103.3

TAB. 6.6 – Caractéristiques des segmentations hiérarchiques retenues sur les modèles de type « animal ».

Les modèles de type *pièce mécanique* présentés à la figure 6.5 ont été segmentés à partir des fonctions de hauteur relatives à la norme de la matrice de covariance pour les faces et à la distance inverse aux lignes de crêtes. Les surfaces ne sont pas parfaitement lisses et le bruit sur la surface est à l'origine de nombreux minima non significatifs. Les régions issues de ces minima sont fusionnées à partir des cascades mais il n'est pas facile, comme le montre la segmentation sur le modèle *Carter*, d'atteindre une précision idéale de segmentation. Le niveau de segmentation précédent du modèle comporte trop de régions, tandis que le suivant n'en propose pas assez, trop de régions ayant fusionné.

Les segmentations sur les modèles de type *animal* font intervenir les mêmes fonctions de hauteur que pour les modèles précédents. Certaines parties des modèles sont mises en évidence par les carreaux de surfaces. Les temps de calculs deviennent importants lorsque le modèle comporte un nombre de vertex élevé. Le modèle Stanford Bunny, qui compte 34834 vertex, nécessite plus de 50 secondes pour calculer la hauteur de chaque vertex à partir de la fonction de distance et à peu près autant pour réaliser la LPE.

Les méthodes de segmentation hiérarchique proposées sont basées sur l'analyse de la surface pour déterminer les frontières. La fonction de hauteur est définie par rapport à des caractéristiques de surface comme la courbure et les lignes de crêtes. C'est en ce sens une approche de segmentation en carreaux surfaciques. Lorsque les informations géométriques de la surface de l'objet comportent une certaine sémantique comme c'est le cas pour les visages, l'approche de segmentation hiérarchique est un outil adapté. Les segmentations obtenues sur les modèles de type *pièce mécanique* sont mitigées car les surfaces sont plutôt bruitées et les critères utilisés ne sont pas suffisants pour distinguer des surfaces relativement uniformes contenant de nombreux minima. Les critères de fusion utilisent le minimum des bassins ainsi que la courbure des points selles. L'approche itérative d'approximation à une primitive [Attene *et al.*, 2006a] est plus adaptée lorsque les modèles sont composés de primitives simples comme le plan, la sphère et le cylindre. Les lignes de crête sont bien caractérisées sur les modèles de type *pièce mécanique*. La distance inverse aux lignes de crêtes est efficace lorsque les lignes ne sont pas parallèles car les fronts de propagation convergent vers un minimum local. Lorsque deux lignes sont parallèles (voir tableau 6.1), les fronts de propagation des deux lignes se rencontrent en plusieurs endroits et génèrent de multiples minima locaux.

Les contours des régions correspondent aux frontières générées par la rencontre des eaux de deux bassins. La forme de la LPE n'est pas contrainte si ce n'est que chaque élément la composant doit être connecté. La figure 6.4(b) montre des frontières assez bruitées. Le lissage des frontières peut être réalisé à partir de la méthode [Clements et Zhang, 2006] qui calcule un nouveau contour à partir d'un ratio minimum entre l'énergie du

nouveau contour et la longueur du contour.

Les méthodes proposées dans cette section réalisent la segmentation hiérarchique du maillage. Plusieurs niveaux de segmentation sont proposés. L'utilisateur a la possibilité de parcourir visuellement les différents niveaux et de choisir celui qui correspond le mieux à ses besoins. La recherche du meilleur niveau est relativement facile car peu de niveaux de segmentation sont construits et l'accès visuel à un niveau est généralement instantané. Le critère utilisé pour les cascades correspond à la profondeur de la LPE. Les différences entre la segmentation par cascades à partir du critère de profondeur de la LPE ou à partir des dynamiques de contour ne sont pas réellement significatives comme le montrent les figures 5.5 et 5.7. La profondeur de la LPE ainsi que les dynamiques de contour sont des critères efficaces. Les dynamiques de contour permettent de mieux caractériser une région, au niveau global, que la profondeur de la LPE. Pour profiter pleinement de l'efficacité des dynamiques de contour, la combinaison des anciens critères (profondeur de la LPE ou dynamiques de contour) avec de nouvelles informations telles que la normale, la taille de la région et le périmètre des régions serait envisageable.

La segmentation hiérarchique proposée s'effectue à partir des informations de courbure de la surface ou des lignes de crête qui sont sensibles à la pose de l'objets 3D. Les lignes de crête et la courbure des vertex ou des faces ne sont pas les mêmes si l'objet est déformé. La segmentation hiérarchique est altérée en fonction de la pose de l'objet.

La complexité de l'algorithme de la LPE est de  $O(N)$  mais l'occupation mémoire est importante car chaque valeur différente de la fonction de hauteur nécessite la création d'une file d'attente. La fonction de hauteur relative à la courbure ainsi que l'algorithme de fusion ont une complexité en  $O(N)$ . La complexité des lignes de crête est aussi linéaire mais fait intervenir de nombreux procédés (ajustement, calcul du tenseur de courbure ainsi que de ses dérivées) qui représentent un temps de calcul assez conséquent. Les temps de calcul sont relativement importants si le modèle dispose d'un nombre de vertex élevé (103 secondes pour le modèle Stanford Bunny qui compte 34834 vertex) mais restent raisonnables pour des modèles de résolution moyenne (0.581 seconde pour le modèle Dinopet qui compte 6564 faces).

Le principal paramètre de la segmentation hiérarchique est le niveau de fusion, que l'utilisateur peut choisir et visualiser directement. Dans le cas de la fonction de hauteur relative à la distance aux lignes de crête, seules les lignes dont la longueur dépasse un certain seuil sont prises en compte pour le calcul de la fonction de distances.

### 6.3 Évaluation de la segmentation réalisée à l'aide de marqueurs générés par squelettisation

La segmentation par LPE à partir de marqueurs est une alternative à la segmentation hiérarchique. La définition automatique de marqueurs est un problème complexe et ne se pose pas de la même manière pour les différents types de modèles. Les modèles de forme *animale*, *humaine* ou *tubulaire* disposent généralement d'un squelette qui permet de repérer les différentes parties. Nous avons détaillé au chapitre précédent la méthode de squelettisation ainsi que le marquage de certaines faces du maillage à partir du squelette. Lors de la phase de squelettisation (amincissement topologique), un chemin est créé entre les faces et les voxels du squelette. Le squelette correspond à un graphe où les sommets sont associés aux voxels de jonctions et les arcs, à un ensemble de voxels ayant au maximum deux voxels voisins. Chaque arc obtient un label différent. Les faces du maillage qui ne sont liées qu'à un seul arc appartiennent à une partie significative et sont marquées avec le label de l'arc. Les faces proches des jonctions n'ont aucun label et sont labellisées à partir de la LPE.

La figure 6.7 présentent différents modèles segmentés à partir de la LPE et des marqueurs générés par squelettisation. La première colonne représente le squelette des modèles ainsi que ses arcs labellisés de couleurs différentes. La deuxième colonne correspond au marquage des faces. Les faces de couleur noire n'ont pu être labellisées en raison de leur proximité à une jonction. La dernière colonne correspond à la segmentation finale avec la LPE et les marqueurs. D'autres modèles segmentés sont proposés à la figure 6.8.

Notre méthode permet la segmentation d'un modèle 3D en parties significatives. Le squelette définit les différentes parties et la LPE est utilisée pour séparer les régions aux jonctions (représentées par des zones de fortes courbures). Il n'existe pas à ce jour de vérité terrain pour valider la cohérence des parties. Les parties sont directement déterminées à partir du graphe du squelette. La précision du squelette dépend de la résolution de la voxelisation. Plusieurs interprétations du squelette sont possibles : la première consiste à repérer le *corps* et à considérer les différents ensembles d'arcs qui lui sont liés jusqu'aux sommets feuilles comme des parties entières. Une autre interprétation peut correspondre à la création systématique de nouveaux marqueurs pour chaque nouveau segment créé.

Les frontières sont déterminées à partir de la LPE avec une fonction de hauteur relative à la courbure. La forme de la frontière n'est pas contrainte et il peut arriver que celle-ci soit en dents de scie. Pour éviter ce phénomène, la récente approche de [Clements et Zhang, 2006] peut être utilisée pour lisser les contours.

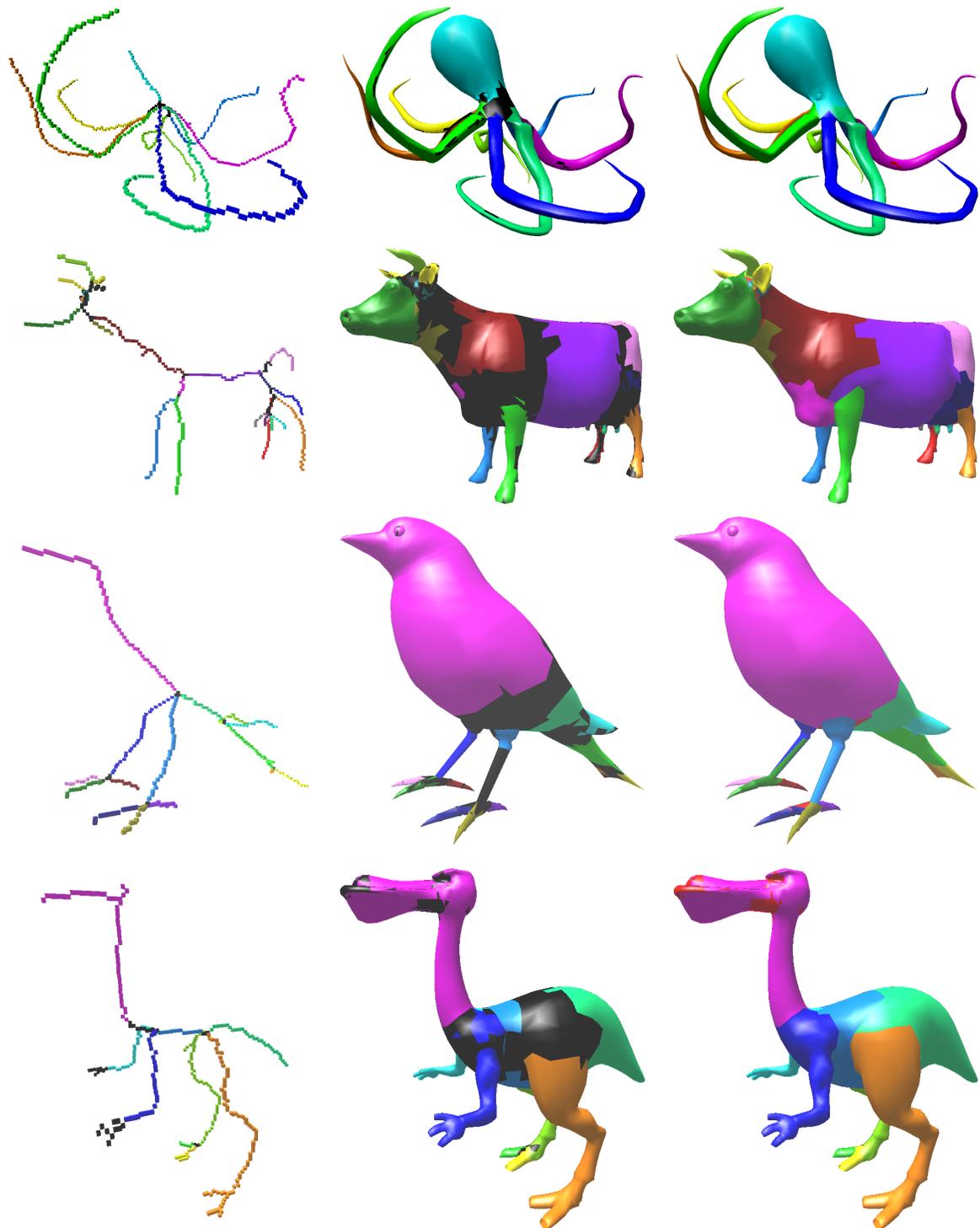


FIG. 6.7 – Segmentations à partir de la LPE et des marqueurs générés par squelettisation.

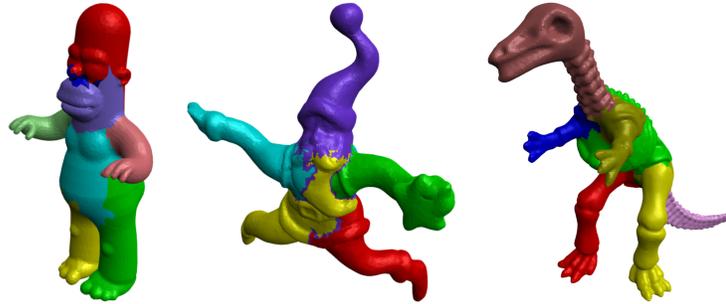


FIG. 6.8 – Segmentation à partir de la LPE et des marqueurs générés par squelettisation.

Le tableau 6.7 propose pour chaque modèle son nombre de vertex, le nombre de voxels obtenus avec la résolution donnée, le temps de calcul du processus de marquage ainsi que celui de la LPE. Le nombre de vertex influence directement le temps de calcul de la LPE ; le temps de calcul du marquage est dépendant du volume de l'objet défini par le nombre de voxels. Le nombre de voxel n'a aucun rapport avec le nombre de vertex, comme le montre le modèle *Cow*, qui dispose d'un nombre relativement faible de vertex et du volume le plus important. Le procédé de squelettisation prend le plus de temps car à chaque itération, tous les vertex de surfaces sont retirés. Le parcours systématique de tous les voxels de l'image 3D est évité grâce aux trois matrices de stockage permettant un accès direct aux voxels de surface suivant une direction donnée. Une image 3D est cependant utilisée pour tester rapidement le voisinage des voxels appartenant à l'objet.

Modèle	Nombre de vertex	Volume en voxels	Résolution	Temps de calcul (s)	
				Marquage	LPE
Octopus	4242	35810	128	10.9	0.15
Cow	2903	110984	128	63.4	0.06
Bird	1129	87977	128	81.2	0.02
Dinopet	3324	91909	100	18.3	0.2
Homer	5103	87160	128	9.9	0.3
Santa	18946	51931	100	11.7	8.9
Dinosaur	56194	21568	100	5.6	96.6

TAB. 6.7 – Caractéristiques des segmentations obtenues à partir de la LPE et des marqueurs générés par squelettisation.

La segmentation hiérarchique du modèle est définie à partir du squelette de l'objet. Le niveau de segmentation peut être contrôlé à partir d'un seuil sur le nombre de voxels de chaque arc ou bien à partir de la séparation de l'arc ou de la jonction *corps* des autres arcs. Dans le dernier cas, les ensembles formés d'arcs qui restent connectés sont associés à des parties différentes. La figure 6.9 montre deux segmentations réalisées à des niveaux de détails différents.

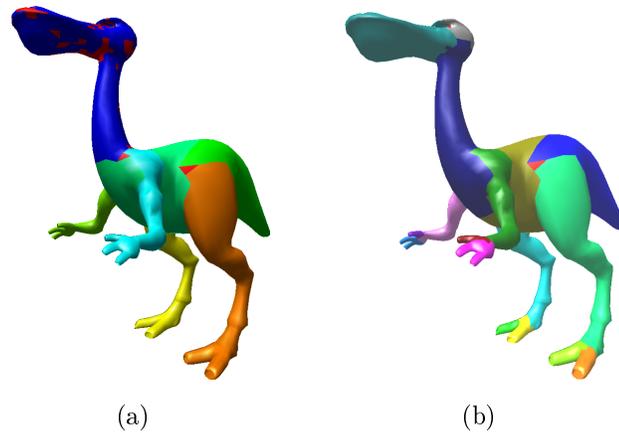


FIG. 6.9 – Segmentation hiérarchique du modèle *Dinopet*. (a) Seul le *corps* et les principales parties sont définies. (b) Tous les arcs du squelette sont utilisés comme marqueurs pour la LPE.

Notre méthode offre une relative insensibilité à la pose. La figure 6.11 montre le modèle *Armadillo* avec différentes poses et avec les mêmes résolutions de voxelisation. Les déformations réalisées sur le modèle engendrent des squelettes pratiquement identiques mais il peut arriver que de nouveaux arcs soient créés ou bien que d'autres disparaissent. Il s'agit généralement d'arcs non significatifs comme cela apparaît sur le premier squelette au niveau des oreilles. Ces arcs ont disparu sur le deuxième squelette. Pour corriger ce problème, nous avons comme perspective de valider les arcs du graphe du squelette à partir des maxima locaux des intégrales des distances géodésiques. La figure 7.1(b) représente l'intégrale des distances géodésiques du modèle *Octopus*. En ne considérant que les arcs associés à un maximum local, seuls les arcs les plus significatifs sont conservés.

Les paramètres de la méthode correspondent principalement à la résolution de la voxelisation ainsi qu'au nombre minimum de voxels pour générer un arc associé à une par-

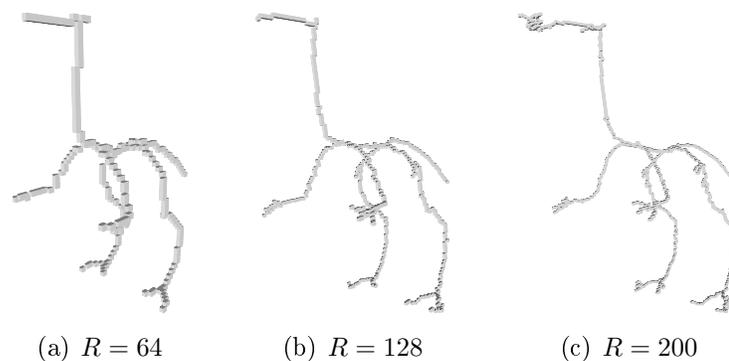


FIG. 6.10 – Squelettes générés à partir de différentes résolutions  $R$  de voxelisation.

tie significative. Une résolution élevée permet une bonne précision mais engendre un squelette plus complexe, avec de nouveaux segments. La figure 6.10 propose plusieurs squelettes du modèle *Dinopet* voxelisé aux résolutions 64, 128 et 200. La résolution la plus grande met en évidence de nouveaux segments non significatifs.

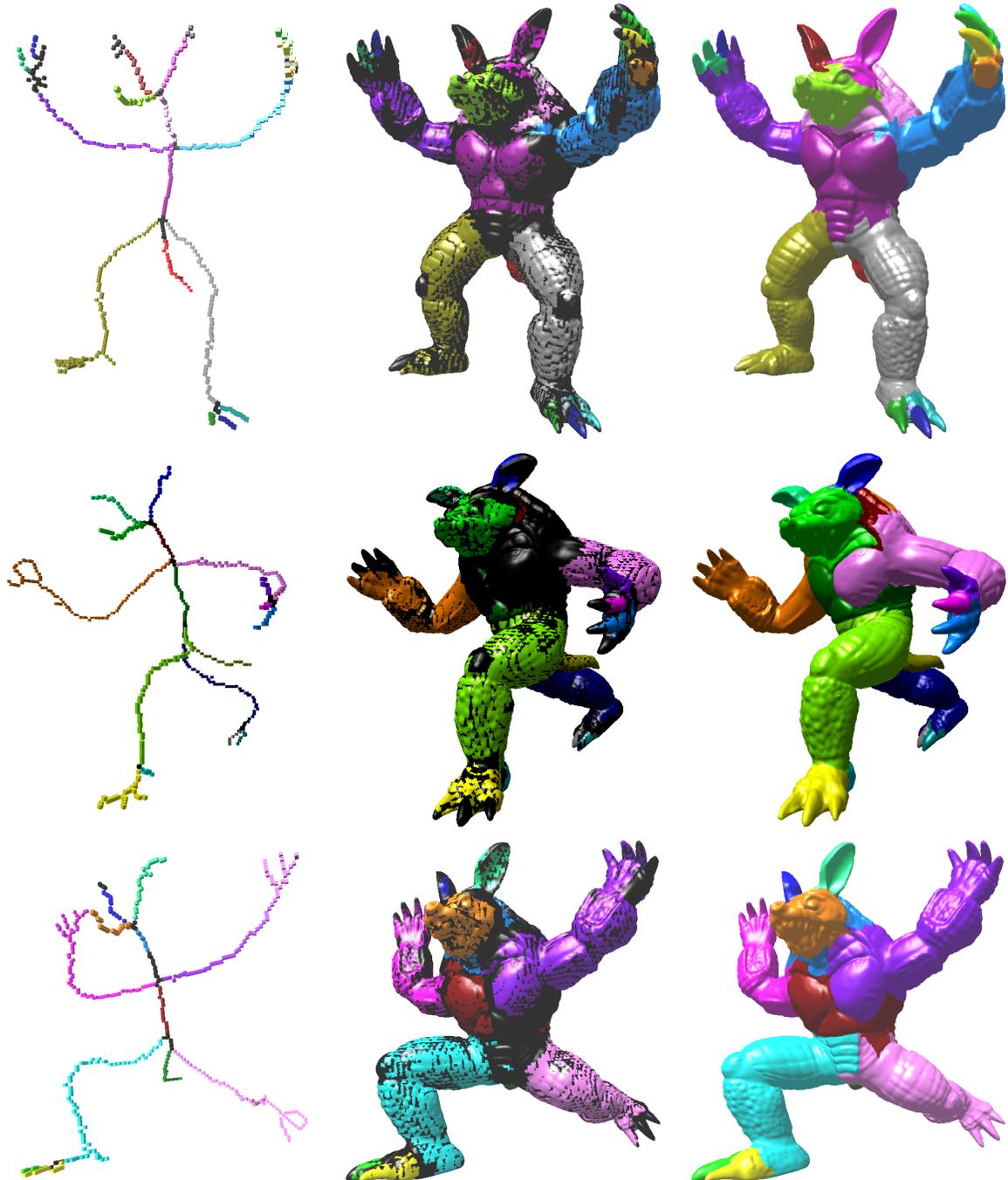


FIG. 6.11 – Sensibilité à la pose.

## 6.4 Comparaison des méthodes de segmentation

L'étude de [Attene *et al.*, 2006b] propose une comparaison visuelle de plusieurs modèles 3D segmentés à partir des méthodes de [Katz et Tal, 2003], [Katz *et al.*, 2005], [Mortara *et al.*, 2004a], [Mortara *et al.*, 2004b] et [Attene *et al.*, 2006a] qui ont été abordées dans l'état de l'art de la segmentation de maillages polygonaux au chapitre 2. Ces méthodes ont des approches de segmentation différentes : [Katz et Tal, 2003] réalisent des décompositions successives du maillages en utilisant un degré d'appartenance flou calculé à partir des distances géodésiques et de l'angle dièdre, [Katz *et al.*, 2005] projettent l'objet dans un espace multi-dimensionnel où les distances euclidiennes deviennent égales aux distances géodésiques un miroir sphérique est utilisé pour faire apparaître le corps de l'objet ainsi que les différentes parties qui y sont reliées, [Mortara *et al.*, 2004a] et [Mortara *et al.*, 2004b] utilisent des sphères pour caractériser les vertex de la surface ou bien pour détecter les zones tubulaires de l'objet et [Attene *et al.*, 2006a] réalisent la segmentation en approximant des carreaux de surface à des primitives de type sphère, plan ou cylindre. La méthode [Delest *et al.*, 2007a] que nous avons présentée dans ce chapitre utilise le squelette de l'objet pour déterminer les principales parties du modèle 3D ainsi que la LPE pour terminer la segmentation.

Les figures suivantes permettent un comparatif visuel des segmentations obtenues sur différents modèles avec les méthodes citées. Les méthodes de [Katz et Tal, 2003], de [Katz *et al.*, 2005] et de [Attene *et al.*, 2006a] offrent généralement de bons résultats pour chacun des modèles. Notre méthode propose des résultats de segmentation similaires sur les modèles *Octopus* et *Dinosaur*. Notre méthode interprète chaque arc du graphe du squelette de l'objet comme une partie significative, c'est la raison pour laquelle certaines différences apparaissent : le nez et la bouche du modèle *Homer* génèrent des arcs lors de la squelettisation ; il en est de même avec les pattes du modèle *Bird*. La tête du modèle *Bird* n'apparaît pas comme une branche significative du squelette et est associée à son corps. Le modèle *Santa* possède un squelette assez complexe, qui est à l'origine de parties au niveau du corps et de la main gauche.

Les évaluations des cinq méthodes de segmentation citées sont proposées dans l'étude comparative de [Attene *et al.*, 2006b]. L'évaluation est réalisée à partir des mêmes critères utilisés dans ce chapitre pour nos méthodes, à savoir : le type de segmentation, l'extraction de régions et de frontières correctes, la segmentation hiérarchique ou multi-échelle, la sensibilité à la pose, la complexité et les paramètres.

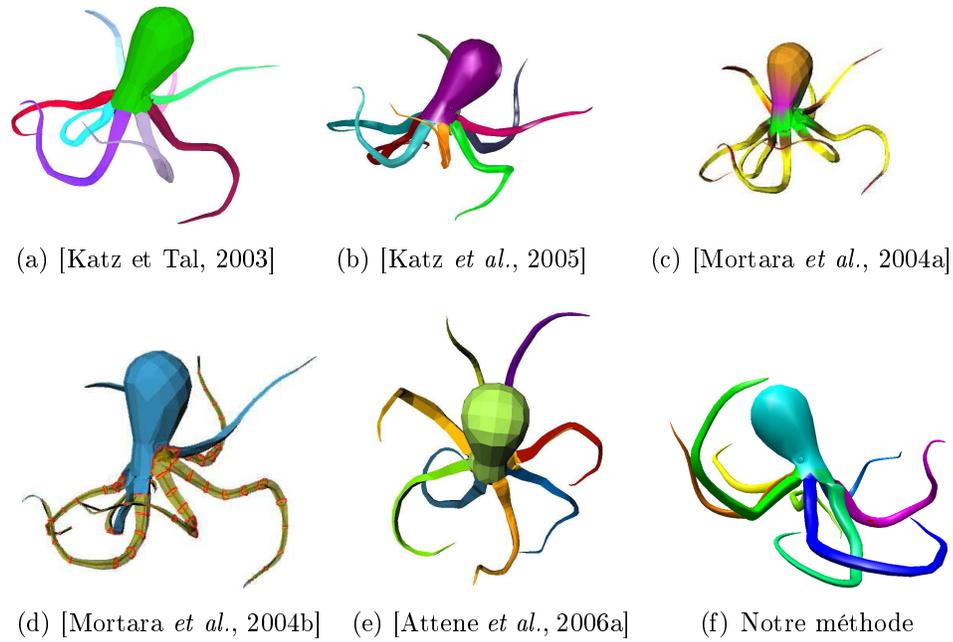


FIG. 6.12 – Comparaison des méthodes de segmentation sur le modèle *Octopus*.

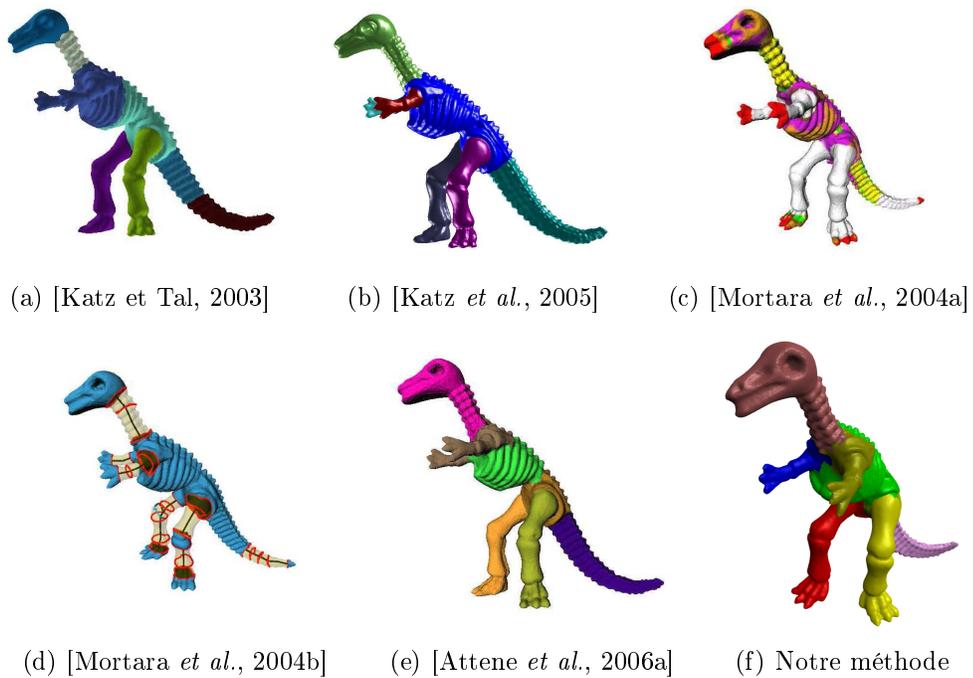


FIG. 6.13 – Comparaison des méthodes de segmentation sur le modèle *Dinosaur*.

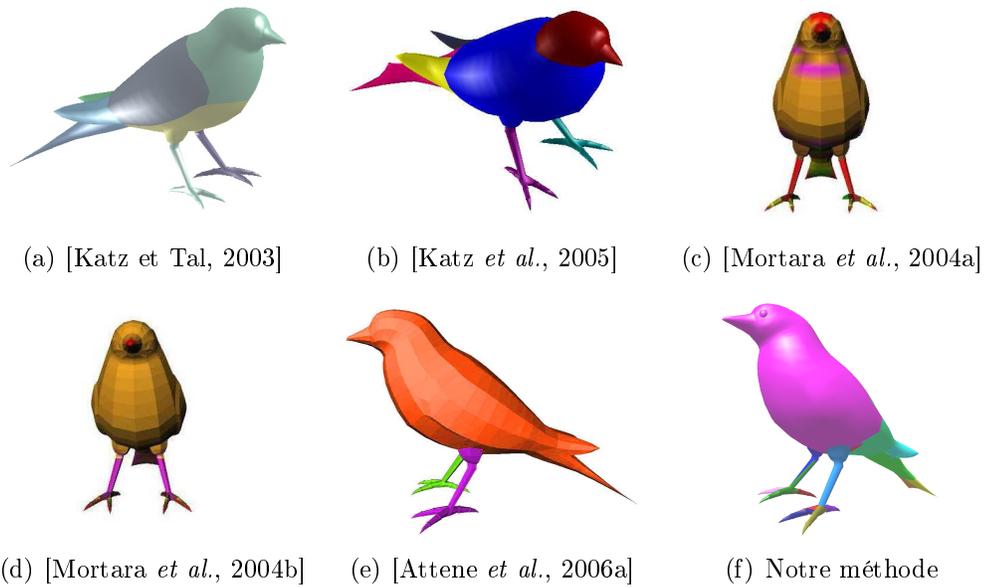


FIG. 6.14 – Comparaison des méthodes de segmentation sur le modèle *Bird*.

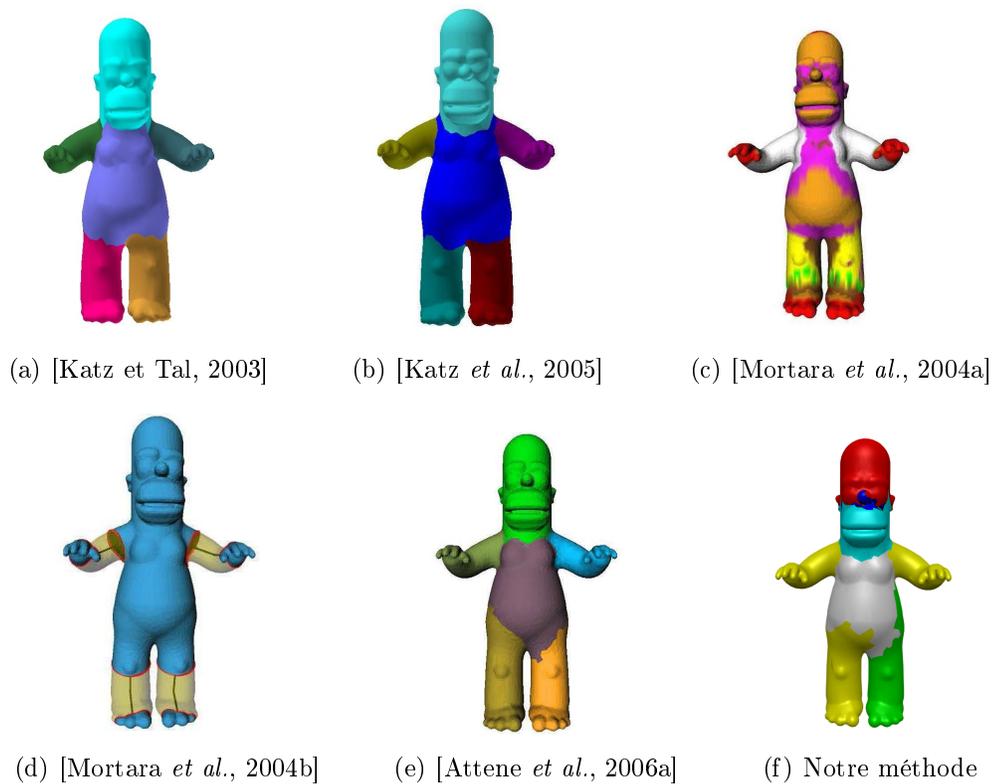


FIG. 6.15 – Comparaison des méthodes de segmentation sur le modèle *Homer*.

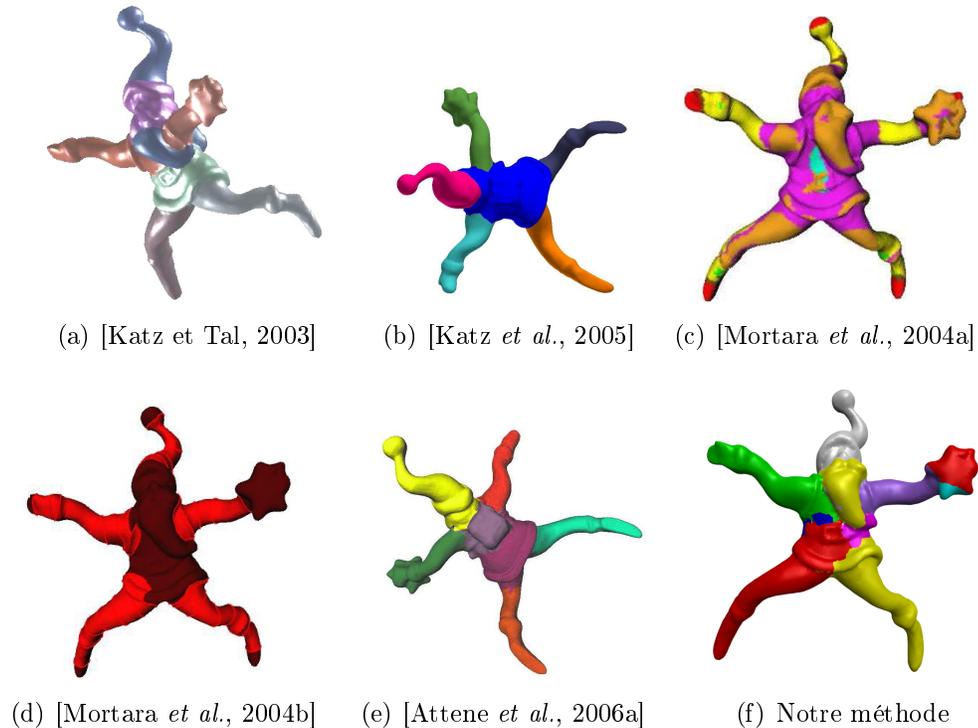


FIG. 6.16 – Comparaison des méthodes de segmentation sur le modèle *Santa*.

## 6.5 Bilan sur les méthodes de segmentation proposées

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats issus des différentes méthodes de segmentation que nous avons développées. Notre recherche est basée sur quatre axes principaux : la LPE, la fonction de hauteur, la segmentation hiérarchique et la segmentation par LPE à partir de marqueurs générés par squelettisation.

La LPE est un outil de segmentation efficace. Elle nécessite la définition d'une fonction de hauteur adaptée à la problématique de segmentation. Nous avons évalué plusieurs fonctions de hauteur, notamment celles basées sur la courbure et celle basée sur la distance inverse aux lignes de crêtes. Nous avons caractérisé la courbure d'une face à partir de la norme de la matrice de covariance qui tient compte des normales des faces adjacentes ainsi que la normale de la face analysée. Par rapport aux autres types de courbure que nous avons testés, celle-ci semble la mieux adaptée à la problématique de segmentation de maillages polygonaux par LPE. Nous avons mis en place une autre fonction de hauteur basée sur la distance inverse aux lignes de crêtes. Ces dernières sont calculées à partir de la méthodes de [Yoshizawa *et al.*, 2005]. Pour réaliser le calcul de distances, nous nous sommes inspirés de l'algorithme fast marching proposé par [Kimmel et Sethian, 1998]. Les points les plus éloignés localement des lignes de crêtes

représentent les nouvelles sources d'inondation de la LPE. Cette méthode correspond à une fonction de hauteur efficace pour la LPE car elle considère les lignes de crêtes comme des contours potentiels que la LPE va fermer.

Pour corriger le phénomène naturel de sur-segmentation de la LPE, nous nous sommes tournés vers des méthodes ayant fait leur preuve sur les images 2D mais qui n'existaient pas dans le domaine de la segmentation de maillages polygonaux. Nous avons publié différents travaux sur des méthodes de fusion de régions basées sur les cascades combinées à la profondeur de la LPE ou aux dynamiques de contour. La courbure minimum d'un bassin et la courbure du point selle d'une frontière sont les principales caractéristiques que nous utilisons pour définir les critères de fusion et réaliser la segmentation hiérarchique. Nos méthodes de segmentation hiérarchique permettent la construction de plusieurs partitions et donnent la possibilité à l'utilisateur de les visionner rapidement pour sélectionner la plus adaptée à son application. Nous avons également proposé une méthode de segmentation basée sur la LPE avec marqueurs générés automatiquement. Le squelette de l'objet est utilisé pour repérer les principales parties et pour marquer les faces qui peuvent leur être associées. La LPE est ensuite employée pour finaliser la segmentation et créer des frontières aux zones de fortes courbures. Nous avons évalué nos méthodes à partir des critères proposés dans [Attene *et al.*, 2006b] et comparé leur efficacité sur les modèle 3D de références (voir annexe C). Il est actuellement difficile d'établir une comparaison précise des méthodes de segmentation car les approches sont généralement étudiées pour un type d'application particulier (voir tableau 2.14). Il n'existe pas de vérité terrain pour mesurer l'efficacité des méthodes de segmentation ; l'évaluation est réalisée de façon visuelle, comme nous l'avons fait à ce chapitre. Le chapitre suivant présente la conclusion ainsi que les perspectives. Nous discutons des travaux réalisés dans le cadre de la thèse et aussi des améliorations possibles.



# Chapitre 7

## Conclusion

### Bilan du travail réalisé

Les applications concernant les modèles 3D sont de plus en plus nombreuses et variées. La segmentation de maillages polygonaux est une étape nécessaire pour la plupart d'entre elles, notamment pour des besoins de paramétrisation, de compression, de reconnaissance de forme, etc. Les travaux de [Shamir, 2004] sont incontournables dans ce domaine ; il a établi les deux principales catégories de segmentation : la segmentation en carreaux surfaciques et la segmentation en parties significatives. Il a également discuté des principaux types de méthodes et critères utilisés dans le cadre de la segmentation. Nous avons prolongés ses travaux en étudiant un plus large éventail de méthodes et de critères.

Parmi les différentes méthodes de segmentation de maillages, il en existe un petit nombre utilisant la LPE. Ce type de méthode nécessite une fonction de hauteur relative aux caractéristiques de la surface du maillage. La courbure est généralement utilisée par les méthodes de segmentation basées sur la LPE. Elle permet une croissance de régions à partir de zones de faibles courbures et fait se rencontrer les régions aux zones de fortes courbures. Nous avons introduit deux nouvelles fonctions de hauteur pour la LPE : la distance inverse aux lignes de crêtes et la courbure d'une face calculée par la norme de la matrice de covariance, qui tient compte des normales des faces adjacentes ainsi que de la normale de la face analysée.

Nous avons travaillé sur deux approches qui faisaient défaut aux précédentes méthodes de LPE. Pour limiter les problèmes de sur-segmentation, nous avons proposé la segmentation hiérarchique et la segmentation à partir de marqueurs générés par squelettisation.

La segmentation hiérarchique permet de créer rapidement plusieurs niveaux de segmentation et donne la possibilité à l'utilisateur de les visionner rapidement pour choisir le plus adapté à son application. Lorsque le modèle possède une forme de type tubulaire, humanoïde ou animale, nous utilisons une nouvelle méthode basée sur le squelette de la forme pour repérer les parties significatives et les marquer pour finaliser la segmentation avec la LPE.

L'évaluation des méthodes de segmentation n'est pas évidente comme cela est souligné dans l'étude comparative de [Attene *et al.*, 2006b] qui propose plusieurs critères d'évaluation ainsi que des modèles segmentés pour une comparaison visuelle. Nous avons utilisé ces critères et les modèles 3D disponibles pour positionner notre travail. En ce qui concerne la segmentation de maillages à partir des marqueurs générés par squelettisation, nos résultats apparaissent similaires aux meilleures méthodes sur certains modèles mais offrent, sur d'autres, une sur-segmentation à cause des branches non significatives du squelette. En ce qui concerne la segmentation hiérarchique, les résultats sont encourageants sur les modèles de type *visage* ou *pièce mécanique* et nous projetons de faire intervenir de nouvelles caractéristiques pour améliorer la segmentation. Les méthodes que nous avons développées offrent de larges perspectives. Nous avons commencé à réfléchir à plusieurs idées et à tester certaines approches que nous décrivons dans ce qui suit.

## Perspectives

Les méthodes de segmentation par ligne de partage des eaux présentent l'avantage de reposer sur un concept physique simple et efficace. Il existe de nombreux algorithmes de LPE 3D qui donnent satisfaction ; la fonction de hauteur nécessite par contre une plus grande investigation. La courbure correspond à la fonction de hauteur la plus populaire. Nous avons présenté une autre fonction basée sur la distance aux lignes de crêtes qui est beaucoup plus pertinente. Les perspectives directes qui en découlent sont une caractérisation plus fine des lignes de crêtes les plus significatives. Dans le cadre de la segmentation en parties significatives, une autre fonction de hauteur semble intéressante, il s'agit de la distance aux points critiques de type « selle ».

### **La fonction de hauteur relative à la distance aux points selles**

Les points critiques et les protrusions ont été abordés à la section 2.4.3. La méthode de [Zhou et Huang, 2004] correspond à une croissance de régions à partir des points extrema jusqu'aux points selles. La méthode que nous proposons n'en est qu'à un stade

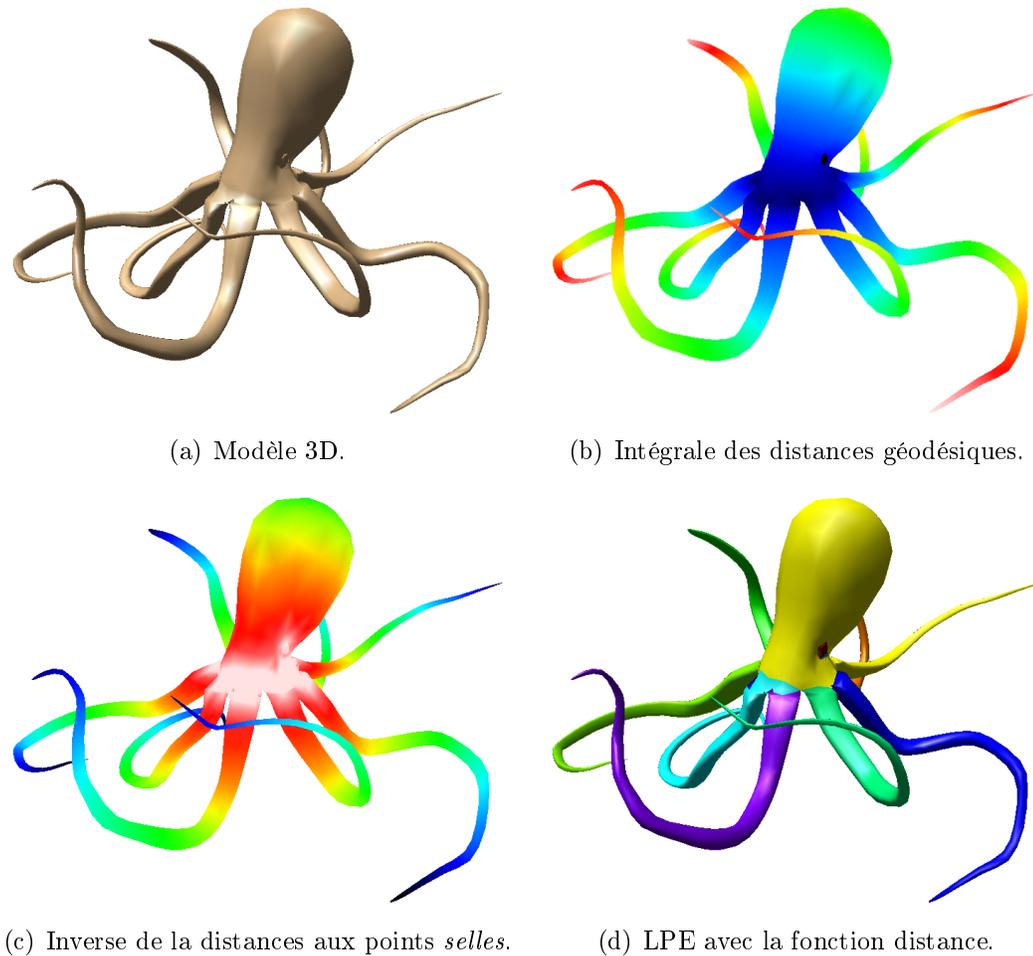


FIG. 7.1 – Segmentation par LPE avec une fonction de distance relative aux points critiques de type *selle*.

préliminaire ; elle correspond à l'utilisation d'une fonction de hauteur relative à la distance aux points selles qui symbolisent potentiellement une intersection entre plusieurs parties. La figure 7.1 représente les deux étapes de la construction de la fonction de hauteur et le résultat de la LPE. L'intégrale des distances géodésiques [Hilaga *et al.*, 2001] permet de caractériser la centricité à partir de la somme des distances d'un point à tous les autres. Un vertex selle a la particularité d'avoir, sur son anneau de degré 1 de vertex voisins, plus d'une alternance de vertex ayant une intégrale des distances géodésiques plus forte et plus faible que lui. Le calcul des distances aux points critiques de type selle est réalisé de la même manière que le calcul de la distance aux lignes de crêtes. Le résultat de la LPE (figure 7.1(d)) est satisfaisant et montre que la méthode est prometteuse.

### Les critères de fusion pour la segmentation hiérarchique

Les cascades et les dynamiques de contour sont des outils puissants de segmentation. A partir du graphe dual de la partition générée par la LPE et des coûts associés aux sommets (les régions) et aux arcs (les frontières entre des régions), ces procédés hiérarchiques permettent d'établir plusieurs niveaux de segmentation parmi lesquels l'utilisateur pourra sélectionner le meilleur. Le choix automatique du meilleur niveau ainsi que les caractéristiques des régions pourrait faire l'objet d'une étude. Nous avons utilisé dans nos travaux les minima des bassins et les minima des frontières ; certains critères comme la taille des régions, le ratio entre le périmètre et l'aire, la texture, etc. pourraient être utilisés pour caractériser d'une meilleure façon chaque région et chaque frontière. Pour obtenir des frontières plus précises, une étude sur la combinaison des contours actifs et de la LPE serait à réaliser pour adapter cette problématique 2D (*watersnakes* [Nguyen *et al.*, 2003]) aux maillages polygonaux.

### La génération automatique de marqueurs pour la LPE

La création des marqueurs à partir du squelette du modèle 3D peut faire l'objet de nombreuses améliorations. D'une part la voxelisation peut être améliorée à partir de méthodes telles que [Passalis *et al.*, 2004], la squelettisation peut être affinée grâce des algorithmes d'amincissement parallèle, la création de liens entre la surface du maillage et le squelette peut suivre le schéma de [Brunner et Brunnett, 2006] et d'autre part l'utilisation d'une fonction de hauteur relative à la loi des minima (section 2.4.1 page 58) serait plus adaptée à la segmentation en parties significatives. Il serait également intéressant de tester nos marqueurs avec les méthodes de [Zhao *et al.*, 2006] et [Ji *et al.*, 2006] basées sur la coupe de graphe. Les frontières peuvent aussi faire l'objet d'améliorations à partir de la méthode de [Clements et Zhang, 2006] qui positionne le meilleur contour à partir du ratio minimum entre un terme d'énergie de contour et la longueur du contour.

La suppression des segments non significatifs du squelette serait une amélioration non négligeable de la méthode. Les méthodes de squelettisation par amincissement font parfois apparaître des extrémités non significatives en raison d'une géométrie particulière de la surface de voxels. Ces segments sont gênants pour notre méthode car ils génèrent des régions non désirées. Les recherches que nous souhaiterions mener par la suite correspondent à la validation de ces segments à partir des protrusions. Si l'extrémité d'un segment peut être associée à un vertex extremum (couleur rouge / blanc sur la figure 7.2(c)) alors ce segment est validé.

Les modèles complexes nécessitent généralement un pas de voxelisation plus élevé que

les modèles simples pour conserver l'ensemble des informations topologiques. Toutefois, pour conserver à la fois les avantages d'une voxelisation de faible résolution (élimination des segments non significatifs, temps de calcul faible) et la topologie des objets, la méthode de [Brunner et Brunnett, 2005] qui caractérise les voxels voisins locaux et globaux peut être utilisée. Un même voxel est alors attribué à deux parties séparées. Ce voxel est dupliqué et chaque instance est associée à un voisinage différent.

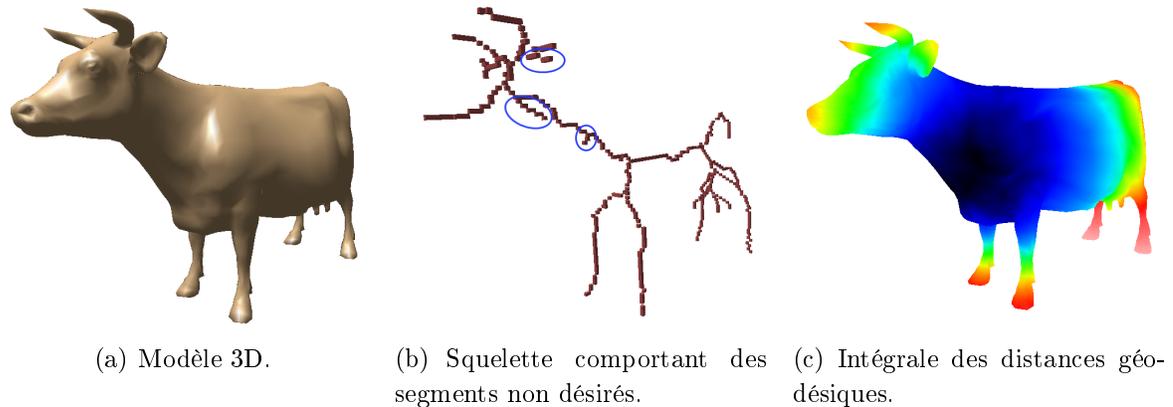


FIG. 7.2 – Suppression des segments non significatifs du squelette à partir des extrema.

Chaque segment significatif du squelette génère une région. Le squelette pourrait faire l'objet d'une analyse pour déterminer les différents niveaux de segmentation d'un modèle 3D. Les études pourraient se tourner vers la comparaison du graphe du squelette avec des graphes sémantiques contenus dans une base de données. Ces graphes sémantiques présenteraient certains niveaux prédéfinis de décomposition d'un objet 3D particulier. Ainsi, si le squelette permet d'identifier un modèle humain, le squelette sémantique de la base de données disposerait de plusieurs schémas de décomposition qui permettent d'obtenir une segmentation très précise (séparation des doigts de la main, des oreilles, du nez, etc.) ou bien plus grossière (segmentation au niveau des principaux membres). La possibilité de choisir les groupes des sous-objets pourrait également être mise à disposition de l'utilisateur. La figure 7.3 montre un graphe de squelette et un exemple de graphe sémantique qui lui a été associé.

### Mise en place d'une vérité terrain pour la segmentation de maillages polygonaux

A l'heure actuelle, il n'existe pas de vérité terrain pour la segmentation de maillages polygonaux. De nombreuses bases ont été développées pour les images, comme nous l'avons vu à la section 2.2.2, mais aucune n'a encore été proposée pour les objets 3D. Il est certes plus long de réaliser une vérité terrain sur un objet 3D car il faut définir manuellement les vertex de frontières. Les méthodes interactives de segmentation abordées à la section 2.3.7 peuvent être utilisées pour réaliser les segmentations et réajuster

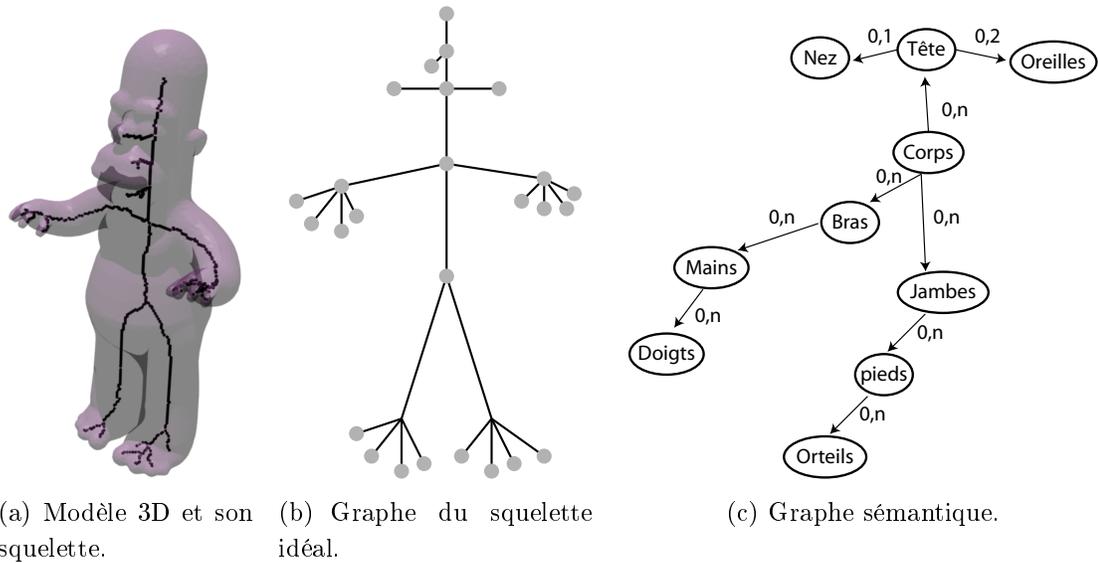


FIG. 7.3 – Recherche du graphe sémantique équivalent au squelette de l'objet 3D.

les contours si besoin. Au moins deux niveaux de détails pourraient être proposés pour chaque modèle ainsi que plusieurs poses pour tester la sensibilité à la pose des méthodes. Le format de fichier Wavefront est adapté à cette problématique car il est d'une part très répandu et d'autre part, il permet de facilement établir des groupes d'objets à l'intérieur d'un même fichier. Enfin, il sera nécessaire d'établir une mesure de distance par rapport à la vérité terrain. Concernant la reconnaissance de formes 3D, la compétition SHREC <sup>1</sup> est organisée chaque année afin de confronter plusieurs méthodes et d'évaluer les résultats sur des formes différentes. Il serait très intéressant d'aborder la comparaison de méthodes et l'évaluation de la segmentation de maillages polygonaux de la même manière que celle proposée lors de cet évènement.

<sup>1</sup>SHREC : Shape Retrieval Contest, <http://www.aimatshape.net/event/SHREC>

# Bibliographie

- [Agathos *et al.*, 2007]AGATHOS, A., PRATIKAKIS, I., PERANTONIS, S., SAPIDIS, N. et AZARIADIS, P. (2007). 3D mesh segmentation methodologies for CAD applications. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(6):827–842.
- [Alexa, 2002]ALEXA, M. (2002). Recent advances in mesh morphing. *Computer Graphics Forum*, 21(2):173–196.
- [Alliez *et al.*, 2003a]ALLIEZ, P., COHEN-STEINER, D., DEVILLERS, O., LÉVY, B. et DESBRUN, M. (2003a). Anisotropic polygonal remeshing. *Dans SIGGRAPH '03 : Proceedings of the 30th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 485 – 493, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Alliez *et al.*, 2003b]ALLIEZ, P., DEVILLERS, O., ISENBURG, M. et VALETTE, S. (2003b). Compression de maillages, un état de l'art. *Dans CORESA '03 : Compression et Représentation des Signaux Audiovisuels*, Lyon.
- [Alliez et Gotsman, 2005]ALLIEZ, P. et GOTSMAN, C. (2005). Recent advances in compression of 3D meshes. *Advances in Multiresolution for Geometric Modelling*, pages 3–26.
- [Alliez *et al.*, 2005]ALLIEZ, P., UCELLI, G., GOTSMAN, C. et ATTENE, M. (2005). Recent advances in remeshing of surfaces. Rapport technique, AIM@SHAPE Network of Excellence.
- [Alpert et Yao, 1995]ALPERT, C. J. et YAO, S.-Z. (1995). Spectral partitioning : the more eigenvectors, the better. *Dans DAC '95 : Proceedings of the 32nd ACM/IEEE Conference on Design Automation*, pages 195–200, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Antini *et al.*, 2005]ANTINI, G., BERRETTI, S., DEL BIMBO, A. et PALA, P. (2005). 3D mesh partitioning for retrieval by parts applications. *Dans ICME '05 : Proceedings of the International Conference on Multimedia and Expo*, pages 1210– 1213, Amsterdam, The Netherlands.
- [Atkar *et al.*, 2005]ATKAR, P. N., GREENFIELD, A., CONNER, D. C., CHOSET, H. et RIZZI, A. A. (2005). Hierarchical segmentation of surfaces embedded in  $\mathbb{R}^3$  for auto-body painting. *Dans ICRA '05 : Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, pages 572– 577, Barcelona, Spain.

- [Attene *et al.*, 2003]ATTENE, M., BIASOTTI, S. et SPAGNUOLO, M. (2003). Shape understanding by contour-driven retiling. *The Visual Computer*, 19(2-3):127–138.
- [Attene *et al.*, 2006a]ATTENE, M., FALCIDIENO, B. et SPAGNUOLO, M. (2006a). Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives. *The Visual Computer : International Journal of Computer Graphics*, 22(3):181–193. <http://efpi-soft.sourceforge.net/>.
- [Attene *et al.*, 2006b]ATTENE, M., KATZ, S., MORTARA, M., PATANÉ, G., SPAGNUOLO, M. et TAL, A. (2006b). Mesh segmentation - a comparative study. *Dans SMI '06 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 14–25, Matsushima, Japan. IEEE Computer Society.
- [Attene *et al.*, 2007a]ATTENE, M., ROBBIANO, F., SPAGNUOLO, M. et FALCIDIENO, B. (2007a). Part-based annotation of virtual 3d shapes. *Dans NASAGEM '07 Workshop : New Advances in Shape Analysis and Geometric Modeling*, Hannover, Germany.
- [Attene *et al.*, 2007b]ATTENE, M., ROBBIANO, F., SPAGNUOLO, M. et FALCIDIENO, B. (2007b). Semantic annotation of 3d surface meshes based on feature characterization. *Dans SAMT '07 : Proceedings of the 2nd international conference on Semantics And digital Media Technologies*, Genova, Italy. <http://shapeannotator.sourceforge.net/>.
- [Aujay *et al.*, 2006]AUJAY, G., HETROY, F. et LAZARUS, F. (2006). Construction automatique d'un squelette pour l'animation de personnages. *Dans AFIG '06 : Les 19ème journées de l'Association Française d'Informatique Graphique et de l'Association Chapitre Français d'Eurographics*.
- [Bac *et al.*, 2005]BAC, A., DANIEL, M. et MALTRET, J.-L. (2005). 3D modelling and segmentation with discrete curvatures. *Journal of Medical Informatics and Technology*, 9:13–24.
- [Baddeley, 1992]BADDELEY, A. J. (1992). An error metric for binary images. *Dans Proceedings of the second International Workshop on Robust Computer Vision : Quality of Vision Algorithms*, pages 59–78, Karlsruhe, Germany.
- [Ballard et Brown, 1982]BALLARD, D. H. et BROWN, C. M. (1982). *Computer Vision*. Prentice Hall Professional Technical Reference.
- [Barr, 1981]BARR, A. H. (1981). Superquadrics and angle-preserving transformations. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1(1):11– 23.
- [Baskurt *et al.*, 2004]BASKURT, A., DUPONT, F., LAVOUÉ, G., RICARD, J., DAOUDI, M., VANDEBORRE, J.-P., FILALI ANSARY, T., DUGELAY, J.-L., GARCIA, E., PRÊTEUX, F. J., ZAHARIA, T. B., BLUM, F., SAVAGE, B., LICHAU, D., FRATANI, F. et DUTARTRE, A. (2004). SEMANTIC-3D : compression, indexation et tatouage de données 3D. *Dans CORESA '04 : Compression et Représentation des Signaux Audiovisuels*, Lille.

- [Beare, 2006]BEARE, R. (2006). A locally constrained watershed transform. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(7):1063–1074.
- [Benkő et Várady, 2004]BENKŐ, P. et VÁRADY, T. (2004). Segmentation methods for smooth point regions of conventional engineering objects. *Computer-Aided Design*, 36(6):511–523.
- [Bergou et al., 2007]BERGOU, M., MATHUR, S., WARDETZKY, M. et GRINSPUN, E. (2007). Tracks : toward directable thin shells. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3):50.
- [Berretti et al., 2006]BERRETTI, S., BIMBO, A. D. et PALA, P. (2006). Partitioning of 3D meshes using reeb graphs. *Dans ICPR '06 : Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition*, volume 1, pages 19–22, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Bertrand, 2007]BERTRAND, G. (2007). On the dynamics. *Image and Vision Computing*, 25(4):447–454.
- [Betser et al., 2005]BETSER, J., DELEST, S. et BONÉ, R. (2005). Unbiased watershed hierarchical 3D segmentation. *Dans VIIP '05 : International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing*, pages 412–417, Benidorm, Spain.
- [Betser et al., 2006]BETSER, J., DELEST, S. et BONÉ, R. (2006). Segmentation 3D hiérarchique par ligne de partage des eaux sans biais. *Dans RFIA '06 : Actes de 15ème Congrès Francophone de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, Tours.
- [Beucher, 1990]BEUCHER, S. (1990). *Segmentation d'images et morphologie mathématique*. Thèse de doctorat, Ecoles des mines de Paris.
- [Beucher, 1994]BEUCHER, S. (1994). Watershed, hierarchical segmentation and waterfall algorithm. *Dans SERRA, J. et SOILLE, P., éditeurs : Mathematical morphology and its applications to image processing*, pages 69–76. Kluwer Academic Publishers.
- [Beucher, 2004]BEUCHER, S. (2004). Algorithmes sans biais de ligne de partage des eaux. Rapport technique, Centre de Morphologie Mathématique de l'École des Mines de Paris.
- [Beucher, 2007]BEUCHER, S. (2007). Numerical residues. *Image and Vision Computing*, 25(4):405–415.
- [Beucher et Lantuéjoul, 1979]BEUCHER, S. et LANTUÉJOUL, C. (1979). Use of watersheds in contour detection. *Dans International Workshop on Image Processing, Real-Time Edge and Motion Detection / Estimation*, Rennes.
- [Biasotti, 2004]BIASOTTI, S. (2004). *Computational Topology Methods for Shape Modelling Applications*. Thèse de doctorat, University of Genoa, Italy.
- [Biasotti et al., 2003]BIASOTTI, S., MARINI, S., MORTARA, M. et PATANÉ, G. (2003). An overview on properties and efficacy of topological skeletons in shape modelling.

- Dans SMI '03 : Proceedings of the Shape Modeling International*, pages 245–256, 297, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Bicego *et al.*, 2003]BICEGO, M., CRISTANI, M., FUSIELLO, A. et MURINO, V. (2003). Watershed-based unsupervised clustering. *Dans EMMCVPR '03 : Proceedings of the 4th International Workshop on Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 83–94, Lisbon, Portugal.
- [Biederman, 1995]BIEDERMAN, I. (1995). Visual object recognition. *Dans KOSSLYN, S. F. et OSHERSON, D. N., éditeurs : An Invitation to Cognitive Science, 2nd edition*, volume 2, chapitre 4, pages 121–165. MIT Press.
- [Bischoff et Kobbelt, 2004]BISCHOFF, S. et KOBBELT, L. P. (2004). Parameterization-free active contour models with topology control. *The Visual Computer : International Journal of Computer Graphics*, 20(4):217–228.
- [Boier-Martin, 2003]BOIER-MARTIN, I. M. (2003). Domain decomposition for multiresolution analysis. *Dans SGP '03 : Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing*, pages 31–40, Aire-la-Ville, Switzerland. Eurographics Association.
- [Botsch *et al.*, 2007]BOTSCH, M., PAULY, M., KOBBELT, L. P., ALLIEZ, P., LÉVY, B., BISCHOFF, S. et RÖSSL, C. (2007). Geometric modeling based on polygonal meshes. *Dans SIGGRAPH '07 : ACM SIGGRAPH 2007 courses*, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Brun *et al.*, 2005]BRUN, L., MOKHTARI, M. et MEYER, F. (2005). Hierarchical watersheds within the combinatorial pyramid framework. *Dans DGCI '05 : Proceedings of the 12th International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery*, volume 3429 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 34–44, Poitiers, France. Springer.
- [Brunner et Brunnett, 2004]BRUNNER, D. et BRUNETT, G. (2004). Mesh segmentation using the object skeleton graph. *Dans CGIM '04 : Proceedings of the seventh International Conference on Computer Graphics and Imaging*, pages 48–55, Kauai, Hawaii, USA.
- [Brunner et Brunnett, 2005]BRUNNER, D. et BRUNETT, G. (2005). An extended concept of voxel neighborhoods for correct thinning in mesh segmentation. *Dans SCCG '05 : Proceedings of the 21st spring conference on Computer graphics*, pages 119–125, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Brunner et Brunnett, 2006]BRUNNER, D. et BRUNETT, G. (2006). Inheriting thinning for skeleton-based mesh decomposition. *Dans International Conference on Curves and Surfaces*, pages 78–87, Avignon, France. Nashboro Press.
- [Cardoso et Corte-Real, 2005]CARDOSO, J. S. et CORTE-REAL, L. (2005). Toward a generic evaluation of image segmentation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14(11): 1773– 1782.

- [Carr *et al.*, 2006]CARR, N. A., HOBEROCK, J., CRANE, K. et HART, J. C. (2006). Rectangular multi-chart geometry images. *Dans SGP '06 : Proceedings of the fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing*, pages 181–190, Sardinia, Italy.
- [Cates *et al.*, 2005]CATES, J. E., WHITAKER, R. T. et JONES, G. M. (2005). Case study : An evaluation of user-assisted hierarchical watershed segmentation. *Medical Image Analysis*, 9(6):566–578.
- [Cazals et Pouget, 2005]CAZALS, F. et POUGET, M. (2005). Topology driven algorithms for ridge extraction on meshes. Rapport technique RR-5526, INRIA.
- [Chabrier, 2005]CHABRIER, S. (2005). *Contribution à l'évaluation de performances en segmentation d'images*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- [Chaine et Bouakaz, 2000]CHAINED, R. et BOUAKAZ, S. (2000). Segmentation of 3-d surface trace points, using a hierarchical tree-based diffusion scheme. *Dans ACCV '00 : Proceedings of the Fourth Asian Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 995–1002, Taiwan.
- [Chazelle *et al.*, 1997]CHAZELLE, B., DOBKIN, D. P., SHOURABOURA, N. et TAL, A. (1997). Strategies for polyhedral surface decomposition : an experimental study. *Computational Geometry : Theory and Applications*, 7(5-6):327 – 342.
- [Chen et Georganas, 2006]CHEN, L. et GEORGANAS, N. D. (2006). An efficient and robust algorithm for 3D mesh segmentation. *Multimedia Tools and Applications*, 29(2): 109–125.
- [Chevalier *et al.*, 2001]CHEVALIER, L., JAILLET, F. et BASKURT, A. (2001). 3D shape coding with superquadrics. *Dans ICIP '01 : Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 2, pages 93–96, Thessaloniki, Greece.
- [Chevalier *et al.*, 2003]CHEVALIER, L., JAILLET, F. et BASKURT, A. (2003). Segmentation and superquadric modeling of 3D objects. *Journal of Winter School of Computer Graphics*, 11(1).
- [Choe *et al.*, 2006]CHOE, S., AHN, M. et LEE, S. (2006). Feature sensitive out-of-core characterization of large polygonal meshes. *Dans CGI '06 : Computer Graphics International*, volume 4035, pages 518–529.
- [Chung, 1997]CHUNG, F. R. K. (1997). *Spectral Graph Theory*. Number 92 in CBMS Regional Conference Series in Mathematics. American Mathematical Society.
- [Clements et Zhang, 2006]CLEMMENTS, A. et ZHANG, H. (2006). Minimum ratio contours on surface meshes. *Dans SMI '06 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 26–37, Matsushima, Japan.
- [Cohen-Steiner *et al.*, 2004]COHEN-STEINER, D., ALLIEZ, P. et DESBRUN, M. (2004). Variational shape approximation. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3):905–914.
- [Cohen-Steiner et Morvan, 2003]COHEN-STEINER, D. et MORVAN, J.-M. (2003). Restricted delaunay triangulations and normal cycle. *Dans SCG '03 : Proceedings of the*

- nineteenth annual Symposium on Computational Geometry*, pages 312–321, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Colin de Verdière et Lazarus, 2002]COLIN DE VERDIÈRE, É. et LAZARUS, F. (2002). Optimal system of loops on an orientable surface. *Dans FOCS '02 : Proceedings of the 43rd Symposium on Foundations of Computer Science*, pages 627–636, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Comaniciu et Meer, 2002]COMANICIU, D. et MEER, P. (2002). Mean shift : A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(5):603–619.
- [Culver *et al.*, 2004]CULVER, T., KEYSER, J. et MANOCHA, D. (2004). Exact computation of the medial axis of a polyhedron. *Computer Aided Geometric Design*, 21(1):65–98.
- [Cutzu, 2000]CUTZU, F. (2000). Computing 3D object parts from similarities among object views. *Dans CVPR '00 : Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 2, pages 95–100.
- [De Winter et Wagemans, 2006]DE WINTER, J. et WAGEMANS, J. (2006). Segmentation of object outlines into parts : A large-scale integrative study. *Cognition*, 99(3):275–325.
- [Delest *et al.*, 2006a]DELEST, S., BONÉ, R. et CARDOT, H. (2006a). 3D watershed transformation based on connected faces structure. *Dans CompIMAGE '06 : Computational Modelling of Objects Represented in Images : fundamentals, methods and applications*, pages 159–163, Coimbra, Portugal.
- [Delest *et al.*, 2006b]DELEST, S., BONÉ, R. et CARDOT, H. (2006b). Fast segmentation of triangular meshes using waterfall. *Dans VIIP '06 : International Conference on Visualisation, Imaging and Image Processing*, pages 308–312, Palma De Mallorca, Spain.
- [Delest *et al.*, 2007a]DELEST, S., BONÉ, R. et CARDOT, H. (2007a). Automatically computed markers for the 3D watershed segmentation. *Dans ICIP '07 : Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 6, San Antonio, Texas, USA.
- [Delest *et al.*, 2007b]DELEST, S., BONÉ, R. et CARDOT, H. (2007b). Hierarchical mesh segmentation using waterfall and dynamics. *Dans ISPA '07 : Proceedings of the 5th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, Istanbul, Turkey.
- [Delest *et al.*, 2006c]DELEST, S., PAGEOT, G., BONÉ, R. et CARDOT, H. (2006c). Génération automatique de marqueurs pour la ligne de partage des eaux 3D. *Dans CORESA '06 : Compression et Représentation des Signaux Audiovisuels*, pages 178–183, Caen, France.
- [Delingette, 1999]DELINGETTE, H. (1999). General object reconstruction based on simplex meshes. *International Journal of Computer Vision*, 32(2):111–146.

- [Dequidt *et al.*, 2002]DEQUIDT, J., GRISONI, L., MESEURE, P. et CHAILLOU, C. (2002). Détection de collisions entre objets rigides convexes autonomes. *Dans AFIG '02 : Les 15ème journées de l'Association Française d'Informatique Graphique et de l'Association Chapitre Français d'Eurographics*, Lyon.
- [Dey *et al.*, 2003]DEY, T. K., GIESEN, J. et GOSWAMI, S. (2003). Shape segmentation and matching with flow discretization. *Dans WADS '03 : Proceedings of the Workshop on Algorithms and Data Structures*, pages 25–36, Ottawa, Ontario.
- [Digabel et Lantuéjoul, 1978]DIGABEL, H. et LANTUÉJOUL, C. (1978). Iterative algorithms. *Dans Actes du Second Symposium Européen d'Analyse Quantitative des Microstructures en Sciences des Matériaux*, pages 85–99, Caen, France. Biologie et Médecine.
- [Eck *et al.*, 1995]ECK, M., DEROSE, T., DUCHAMP, T., HOPPE, H., LOUNSBERRY, M. et STUETZLE, W. (1995). Multiresolution analysis of arbitrary meshes. *Dans SIGGRAPH '95 : Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 173–182, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Erickson et Har-Peled, 2002]ERICKSON, J. et HAR-PELED, S. (2002). Optimally cutting a surface into a disk. *Dans SCG '02 : Proceedings of the 18th annual symposium on Computational geometry*, pages 244–253, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Falcidieno et Spagnuolo, 1992]FALCIDIENO, B. et SPAGNUOLO, M. (1992). Polyhedral surface decomposition based on curvature analysis. *Dans International Workshop on Modern Geometric Computing for Visualization*, pages 57–72. Springer-Verlag.
- [Fjørtoft, 1999]FJØRTOFT, R. (1999). *Segmentation d'images radar par détection de contours*. Thèse de doctorat, CESBIO – LIMA/ENSEEIH, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- [Floater et Hormann, 2005]FLOATER, M. S. et HORMANN, K. (2005). Surface parameterization : a tutorial and survey. *Dans DODGSON, N. A., FLOATER, M. S. et SABIN, M. A., éditeurs : Advances in multiresolution for geometric modelling*, pages 157–186. Springer Verlag.
- [Fowlkes *et al.*, 2004]FOWLKES, C. C., BELONGIE, S., CHUNG, F. R. K. et MALIK, J. (2004). Spectral grouping using the nyström method. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(2):214–225.
- [Funkhouser *et al.*, 2004]FUNKHOUSER, T., KAZHDAN, M., SHILANE, P., MIN, P., KIEFER, W., TAL, A., RUSINKIEWICZ, S. et DOBKIN, D. P. (2004). Modeling by example. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3):652–663.
- [Garland et Heckbert, 1997]GARLAND, M. et HECKBERT, P. S. (1997). Surface simplification using quadric error metrics. *Dans SIGGRAPH '97 : Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 209–216, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.

- [Garland *et al.*, 2001]GARLAND, M., WILLMOTT, A. et HECKBERT, P. S. (2001). Hierarchical face clustering on polygonal surfaces. *Dans SI3D '01 : Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D graphics*, pages 49–58, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Gatica-Perez *et al.*, 2001]GATICA-PEREZ, D., GU, C. et SUN, M.-T. (2001). Semantic video object extraction using four-band watershed and partition lattice operators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 11(5):603–618.
- [Gee et Abidi, 1995]GEE, L. A. et ABIDI, M. A. (1995). Segmentation of range images using morphological operations : review and examples. *Dans CASASANT, D. P., éditeur : Proceedings of SPIE, Intelligent Robots and Computer Vision XIV : Algorithms, Techniques, Active Vision, and Materials Handling*, pages 734–746.
- [Gelfand et Guibas, 2004]GELFAND, N. et GUIBAS, L. J. (2004). Shape segmentation using local slippage analysis. *Dans SGP '04 : Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, pages 214–223, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Géraud *et al.*, 2001]GÉRAUD, T., STRUB, P.-Y. et DARBON, J. (2001). Color image segmentation based on automatic morphological clustering. *Dans ICIP '01 : Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 3, pages 70–73, Thessaloniki, Greece.
- [Gobbetti *et al.*, 2003]GOBBETTI, E., SPANÒ, L. et AGUS, M. (2003). Hierarchical higher order face cluster radiosity for global illumination walkthroughs of complex non-diffuse environments. *Computer Graphics Forum*, 22(3):563–572. Proc. Eurographics 2003.
- [Gotsman, 2003]GOTSMAN, C. (2003). On graph partitioning, spectral analysis, and digital mesh processing. *Dans SMI '03 : Proceedings of the Shape Modeling International*, pages 165–171, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Grau *et al.*, 2004]GRAU, V., MEWES, A. U. J., RAYA, M. A., KIKINIS, R. et WARFIELD, S. K. (2004). Improved watershed transform for medical image segmentation using prior information. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 23(4):447–458.
- [Gregory *et al.*, 1999]GREGORY, A., STATE, A., LIN, M. C., MANOCHA, D. et LIVINGSTON, M. A. (1999). Interactive surface decomposition for polyhedral morphing. *The Visual Computer*, 15(9):453 – 470.
- [Grimaud, 1992]GRIMAUD, M. (1992). A new measure of contrast : Dynamics. *Dans Image Algebra and Morphological Processing*, volume SPIE 1769, pages 292–305, San Diego, USA.
- [Gu *et al.*, 2002]GU, X., GORTLER, S. J. et HOPPE, H. (2002). Geometry images. *Dans SIGGRAPH '02 : Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 355–361, New York, NY, USA. ACM Press.

- [Günther *et al.*, 2006]GÜNTHER, J., FRIEDRICH, H., WALD, I., SEIDEL, H.-P. et SLUSALLEK, P. (2006). Ray tracing animated scenes using motion decomposition. *Computer Graphics Forum*, 25(3):517–525.
- [Hanbury et Marcotegui, 2006]HANBURY, A. et MARCOTEGUI, B. (2006). Waterfall segmentation of complex scenes. *Dans ACCV '06 : Proceedings of the 7th Asian Conference on Computer Vision*, volume 3851, pages 888–897, Hyderabad, India.
- [Haralick et Harpaz, 2007]HARALICK, R. et HARPAZ, R. (2007). Linear manifold clustering in high dimensional spaces by stochastic search. *Pattern Recognition*, 40(10):2672–2684.
- [Hetroy, 2003]HETROY, F. (2003). *Méthodes de partitionnement de surfaces*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Hettiaratchi et Cheung, 2003]HETTIARATCHI, S. et CHEUNG, P. Y. K. (2003). Mesh partitioning approach to energy efficient data layout. *Dans DATE '03 : Proceedings of the conference on Design, Automation and Test in Europe*, pages 1076 – 1081, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Hilaga *et al.*, 2001]HILAGA, M., SHINAGAWA, Y., KOHMURA, T. et KUNII, T. L. (2001). Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes. *Dans SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 203–212, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Hildebrandt *et al.*, 2005]HILDEBRANDT, K., POLTHIER, K. et WARDETZKY, M. (2005). Smooth feature lines on surface meshes. *Dans SGP '05 : Proceedings of the Third Eurographics Symposium on Geometry Processing*, pages 85–90, Austria.
- [Hill *et al.*, 2003]HILL, P. R., CANAGARAJAH, C. N. et BULL, D. R. (2003). Image segmentation using a texture gradient based watershed transform. *IEEE Transactions on Image Processing*, 12(12):1618– 1633.
- [Hoffman et Richards, 1987]HOFFMAN, D. D. et RICHARDS, W. A. (1987). Parts of recognition. *Readings in Computer Vision : Issues, Problems, Principles and Paradigms*, pages 227–242.
- [Hoffman et Singh, 1997]HOFFMAN, D. D. et SINGH, M. (1997). Saliency of visual parts. *Cognition*, 63(1):29–78.
- [Hoppe, 1996]HOPPE, H. (1996). Progressive meshes. *Dans SIGGRAPH '96 : Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 99–108, New York. ACM Press.
- [Huet et Philipp-Foliguet, 1998]HUET, F. et PHILIPP-FOLIGUET, S. (1998). Fusion of images interpreted by a new fuzzy classifier. *Pattern Analysis and Applications*, 1:231–247.
- [Ikonen, 2007]IKONEN, L. (2007). Priority pixel queue algorithm for geodesic distance transforms. *Image and Vision Computing*, 25(10):1520–1529.

- [Inoue *et al.*, 2001]INOUE, K., ITOH, T., YAMADA, A., FURUHATA, T. et SHIMADA, K. (2001). Face clustering of a large-scale cad model for surface mesh generation. *Computer-Aided Design*, 33(3):251–261.
- [James et Twigg, 2005]JAMES, D. L. et TWIGG, C. D. (2005). Skinning mesh animations. *Dans SIGGRAPH '05 : ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, pages 399–407, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Ji *et al.*, 2006]JI, Z., LIU, L., CHEN, Z. et WANG, G. (2006). Easy mesh cutting. *Computer Graphics Forum*, 25(3):283–291.
- [Jiménez *et al.*, 2001]JIMÉNEZ, P., THOMAS, F. et TORRAS, C. (2001). 3D collision detection : a survey. *Computers and Graphics*, 25(2):269–285.
- [Julius *et al.*, 2005]JULIUS, D., KRAEVOY, V. et SHEFFER, A. (2005). D-charts : Quasi-developable mesh segmentation. *Computer Graphics Forum, Proceedings of Eurographics 2005*, 24(3):581–590.
- [Jung et Kim, 2004]JUNG, M. et KIM, H. (2004). Snaking across 3D meshes. *Dans PG '04 : Proceedings of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages 87–93, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Kalvin et Taylor, 1996]KALVIN, A. D. et TAYLOR, R. H. (1996). Superfaces : Polygonal mesh simplification with bounded error. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16(3):64–77.
- [Karabassi *et al.*, 1999]KARABASSI, E.-A., PAPAIOANNOU, G. et THEOHARIS, T. (1999). A fast depth-buffer-based voxelization algorithm. *Journal of Graphics Tools*, 4(4):5–10.
- [Karni et Gotsman, 2000]KARNI, Z. et GOTSMAN, C. (2000). Spectral compression of mesh geometry. *Dans SIGGRAPH '00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 279–286, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [Karypis et Kumar, 1998]KARYPIS, G. et KUMAR, V. (1998). *METIS : a software package for partitioning unstructured graphs and computing fill-reduced orderings of sparse matrices*. University of Minnesota, Department of Computer Science / Army HPC Research Center.
- [Katz *et al.*, 2005]KATZ, S., LEIFMAN, G. et TAL, A. (2005). Mesh segmentation using feature point and core extraction. *The Visual Computer*, 21(8-10):649–658.
- [Katz et Tal, 2003]KATZ, S. et TAL, A. (2003). Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3):954–961.
- [Kima *et al.*, 2006]KIMA, D. H., YUN, I. D. et LEE, S. U. (2006). Boundary-trimmed 3D triangular mesh segmentation based on iterative merging strategy. *Pattern Recognition*, 39(5):827–838.

- [Kimmel et Sethian, 1998]KIMMEL, R. et SETHIAN, J. A. (1998). Computing geodesic paths on manifolds. *Dans Proceedings of the National Academy of Sciences*, volume 95, pages 8431–8435.
- [Korošec et al., 2004]KOROŠEC, P., ŠILC, J. et ROBIČ, B. (2004). Solving the mesh-partitioning problem with an ant-colony algorithm. *Parallel Computing*, 30(5-6):785–801.
- [Kraevoy et al., 2006]KRAEVOY, V., JULIUS, D. et SHEFFER, A. (2006). Shuffler : Modeling with interchangeable parts. Rapport technique, Department of Computer Science, University of British Columbia.
- [Lai et al., 2006]LAI, Y.-K., ZHOU, Q.-Y., HU, S.-M. et MARTIN, R. R. (2006). Feature sensitive mesh segmentation. *Dans SPM '06 : Proceedings of the 2006 ACM symposium on Solid and physical modeling*, pages 17–25, Cardiff University, Wales, UK. ACM Press.
- [Lai et al., 2007]LAI, Y.-K., ZHOU, Q.-Y., HU, S.-M., WALLNER, J. et POTTMANN, H. (2007). Robust feature classification and editing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(1):34–45.
- [Lavoué et al., 2004]LAVOUÉ, G., DUPONT, F. et BASKURT, A. (2004). Curvature tensor based triangle mesh segmentation with boundary rectification. *Dans CGI '04 : Computer Graphics International*, pages 10–17, Crete, Greece.
- [Lavoué et al., 2005a]LAVOUÉ, G., DUPONT, F. et BASKURT, A. (2005a). High rate compression of cad meshes based on subdivision inversion. *Annals of Telecommunications*, 60(11-12):1286–1310.
- [Lavoué et al., 2005b]LAVOUÉ, G., DUPONT, F. et BASKURT, A. (2005b). A new CAD mesh segmentation method, based on curvature tensor analysis. *Computer-Aided Design*, 37(10):975–987.
- [Lazarus et Verroust, 1998]LAZARUS, F. et VERROUST, A. (1998). 3D metamorphosis : a survey. *The Visual Computer*, 14:8–9.
- [Lazarus et Verroust, 1999]LAZARUS, F. et VERROUST, A. (1999). Level set diagrams of polyhedral objects. *Dans SMA '99 : Proceedings of the fifth ACM symposium on Solid modeling and applications*, pages 130–140, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Lee et al., 1998]LEE, A. W. F., SWELDENS, W., SCHRÖDER, P., COWSAR, L. et DOBKIN, D. P. (1998). Maps : Multiresolution adaptive parameterization of surface. *Dans SIGGRAPH '98 : Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 95–104, Orlando, USA.
- [Lee et Kwon, 2007]LEE, S.-H. et KWON, K.-R. (2007). A watermarking for 3D mesh using the patch CEGIs. *Digital Signal Processing*, 17(2):396–413.
- [Lee et al., 2005a]LEE, T.-Y., LIN, P.-H., YAN, S.-U. et LIN, C.-H. (2005a). Mesh decomposition using motion information from animation sequences : Animating geometrical models. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 16(3-4):519–529.

- [Lee *et al.*, 2006]LEE, T.-Y., WANG, Y.-S. et CHEN, T.-G. (2006). Segmenting a deforming mesh into near-rigid components. *The Visual Computer : International Journal of Computer Graphics*, 22(9):729–739.
- [Lee *et al.*, 2004]LEE, Y., LEE, S., SHAMIR, A., COHEN-OR, D. et SEIDEL, H.-P. (2004). Intelligent mesh scissoring using 3D snakes. *Dans PG '04 : Proceedings of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages 279–287, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Lee *et al.*, 2005b]LEE, Y., LEE, S., SHAMIR, A., COHEN-OR, D. et SEIDEL, H.-P. (2005b). Mesh scissoring with minima rule and part salience. *Computer Aided Geometric Design*, 22(5):444–465.
- [Lefebvre et Dachsbacher, 2007]LEFEBVRE, S. et DACHSBACHER, C. (2007). Tiletrees. *Dans i3D '07 : Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, pages 25 – 31, Seattle, Washington. ACM SIGGRAPH, ACM Press.
- [Lemaréchal *et al.*, 1998]LEMARÉCHAL, C., FJØRTOFT, R., MARTON, P. et CUBERO-CASTAN, E. (1998). Comments on 'geodesic saliency of watershed contours and hierarchical segmentation'. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(7):762–763.
- [Leonardis *et al.*, 1997]LEONARDIS, A., JAKLIČ, A. et SOLINA, F. (1997). Superquadrics for segmentation and modeling range data. *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, 19(11):1289–1295.
- [Lévy et Mallet, 2000]LÉVY, B. et MALLET, J.-L. (2000). Paramétrisation des surfaces triangulées. *Revue Internationale de CFAO et d'Informatique Graphique*, 15(1):25–42.
- [Lévy *et al.*, 2002]LÉVY, B., PETITJEAN, S., RAY, N. et MAILLOT, J. (2002). Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation. *Dans SIGGRAPH '02 : Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 362–371, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Lezoray et Cardot, 2002]LEZORAY, O. et CARDOT, H. (2002). Histogram and watershed based segmentation of color images. *Dans CGIV '02 : Proceedings of the 1st European Conference on Color in Graphics, Image and Vision*, pages 358–362.
- [Lezoray et Cardot, 2003]LEZORAY, O. et CARDOT, H. (2003). Hybrid color image segmentation using 2d histogram clustering and region merging. *Dans ICISP '03 : Proceedings of the International Conference on Image and Signal Processing*, volume 1.
- [Li *et al.*, 2001]LI, X., TOON, T. W. et HUANG, Z. (2001). Decomposing polygon meshes for interactive applications. *Dans SI3D '01 : Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D graphics*, pages 35–42. ACM Press.
- [Li *et al.*, 2004]LI, Y., SUN, J., TANG, C.-K. et SHUM, H.-Y. (2004). Lazy snapping. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3):303–308.

- [Lien et Amato, 2004] LIEN, J.-M. et AMATO, N. M. (2004). Approximate convex decomposition of polyhedra. *Dans SIGGRAPH '04 : ACM SIGGRAPH 2004 Posters*, page 2, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Lien et Amato, 2006] LIEN, J.-M. et AMATO, N. M. (2006). Approximate convex decomposition of polyhedra. Rapport technique TR06-002, Parasol Laboratory, Department of Computer Science, Texas A&M University.
- [Lien et al., 2006] LIEN, J.-M., KEYSER, J. et AMATO, N. M. (2006). Simultaneous shape decomposition and skeletonization. *Dans SPM '06 : Proceedings of the 2006 ACM symposium on Solid and Physical Modeling*, pages 219–228, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Lin et al., 2007] LIN, H.-Y. S., LIAO, H.-Y. M. et LIN, J.-C. (2007). Visual salience-guided mesh decomposition. *IEEE Transactions on Multimedia*, 9(1):46–57.
- [Lin et Gottschalk, 1998] LIN, M. C. et GOTTSCHALK, S. (1998). Collision detection between geometric models : A survey. *Dans Proceedings of IMA Conference on Mathematics of Surfaces*, pages 37–56.
- [Liu et al., 2006a] LIU, R., JAIN, V. et ZHANG, H. (2006a). Sub-sampling for efficient spectral mesh processing. *Dans CGI '06 : Computer Graphics International*, pages 172–184. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Liu et Zhang, 2004] LIU, R. et ZHANG, H. (2004). Segmentation of 3D meshes through spectral clustering. *Dans PG '04 : Proceedings of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages 298–305, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Liu et Zhang, 2007] LIU, R. et ZHANG, H. (2007). Mesh segmentation via spectral embedding and contour analysis. *Computer Graphics Forum (Special Issue of Eurographics 2007)*, 26.
- [Liu et al., 2006b] LIU, S., MARTIN, R. R., LANGBEIN, F. C. et ROSIN, P. L. (2006b). Segmenting reliefs on triangle meshes. *Dans SPM '06 : Proceedings of the 2006 ACM symposium on Solid and Physical Modeling*, pages 7–16, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Liyang et al., 2004] LIYAN, Z., SHENGLAN, L., XI, W. et LAISHUI, Z. (2004). Segmentation and parametrization of arbitrary polygon meshes. *Dans GMP '04 : Proceedings of the Geometric Modeling and Processing 2004*, page 143, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Lloyd, 1982] LLOYD, S. P. (1982). Least squares quantization in pcm. *IEEE Transactions on Information Theory*, 28(2):129–137.
- [Lohou, 2001] LOHOU, C. (2001). *Contribution à l'analyse topologique des images : Etude d'algorithmes de squelettisation pour images 2D et 3D, selon une approche topologie digitale ou topologie discrète*. Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée.

- [Lohou et Bertrand, 2007]LOHOU, C. et BERTRAND, G. (2007). Two symmetrical thinning algorithms for 3D binary images, based on p-simple points. *Pattern Recognition*, 40(8):2301–2314.
- [Lotufo et da Silva, 2002]LOTUFO, R. d. A. et da SILVA, W. D. F. (2002). Minimal set of markers for the watershed transform. *Dans International Symposium on Mathematical Morphology*, volume 1, pages 359–368.
- [Mademlis et al., 2007]MADEMLIS, A., DARAS, P., TZOVARAS, D. et STRINTZIS, M. (2007). On 3D partial matching of meaningful parts. *Dans ICIP '07 : Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 2, pages 517–520, San Antonio, Texas, USA.
- [Mamou et al., 2006a]MAMOU, K., ZAHARIA, T. B., PREDĂ, M. et PRÊTEUX, F. J. (2006a). Results of evaluation experiment ee1 on static and animated 3d mesh coding : skinning-based dynamic mesh compression. Rapport technique Standardization Report ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, MPEG06/13888, Hangzhou, China.
- [Mamou et al., 2006b]MAMOU, K., ZAHARIA, T. B. et PRÊTEUX, F. J. (2006b). A skinning approach for dynamic 3D mesh compression. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 17(3-4):337 – 346.
- [Mamou et al., 2007a]MAMOU, K., ZAHARIA, T. B. et PRÊTEUX, F. J. (2007a). FAMC : La nouvelle technologie MPEG-4 pour la compression d'animations 3D. *Dans TAIMA' 07 : Actes 5ème Ateliers de Travail sur l'Analyse d'Images, Méthodes et Applications*, pages 381–388, Hammamet, Tunisia.
- [Mamou et al., 2007b]MAMOU, K., ZAHARIA, T. B. et PRÊTEUX, F. J. (2007b). Segmentation au sens du mouvement de maillages dynamiques. *Dans GRETSI '07 : 21<sup>e</sup> colloque GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images*, pages 69–72, Troyes.
- [Manay et al., 2004]MANAY, S., HONG, B.-W., YEZZI, A. J. et SOATTO, S. (2004). Integral invariant signatures. *Dans ECCV '04 : Proceedings of the 8th European Conference on Computer Vision*, pages 87–99, Prague.
- [Mangan et Whitaker, 1999]MANGAN, A. P. et WHITAKER, R. T. (1999). Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4):308–321.
- [Manzanera et al., 2002]MANZANERA, A., BERNARD, T. M., PRÊTEUX, F. J. et LONGUET, B. (2002).  $n$ -dimensional skeletonization : a unified mathematical framework. *Journal of Electronic Imaging*, 11(1):25–37.
- [Marcotegui et Beucher, 2005]MARCOTEGUI, B. et BEUCHER, S. (2005). Fast implementation of waterfall based on graphs. *Dans Computational Imaging and Vision*, volume 30 de *Computational Imaging and Vision*, pages 177–186. Springer-Verlag, Dordrecht.
- [Marinov et Kobbelt, 2006]MARINOV, M. et KOBELT, L. P. (2006). A robust two-step procedure for quad-dominant remeshing. *Computer Graphics Forum*.

- [Martin, 2003]MARTIN, D. R. (2003). *An Empirical Approach to Grouping and Segmentation*. Thèse de doctorat, EECS Department, University of California, Berkeley.
- [Martin *et al.*, 2004]MARTIN, D. R., FOWLKES, C. C. et MALIK, J. (2004). Learning to detect natural image boundaries using local brightness, color, and texture cues. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(5):530–549.
- [Martin *et al.*, 2001]MARTIN, D. R., FOWLKES, C. C., TAL, D. et MALIK, J. (2001). A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics. *Dans International Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 416–423, Vancouver.
- [Meijster et Roerdink, 1995]MEIJSTER, A. et ROERDINK, J. B. (1995). A proposal for the implementation of a parallel watershed algorithm. *Dans CAIP '95 : Proceedings of the 6th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, pages 790–795, London, UK. Springer-Verlag.
- [Meyer et Marin, 2004]MEYER, A. et MARIN, P. (2004). Segmentation of 3D triangulated data points using edges constructed with a c1 discontinuous surface fitting. *Computer-Aided Design*, 36(13):1327–1336.
- [Meyer, 1991]MEYER, F. (1991). Un algorithme optimal de ligne de partage des eaux. *Dans AFCET '91 : Actes du 8ème Congrès AFCET*, pages 847–859, Lyon-Villeurbanne, France.
- [Meyer *et al.*, 2003]MEYER, M., DESBRUN, M., SCHRÖDER, P. et BARR, A. H. (2003). Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds. *Dans HEGE, H.-C. et POLTHIER, K., éditeurs : Visualization and Mathematics III*, pages 35–57. Springer-Verlag, Heidelberg.
- [Milroy *et al.*, 1997]MILROY, M. J., BRADLEY, C. et VICKERS, G. W. (1997). Segmentation of a wrap-around model using an active contour. *Computer-Aided Design*, 29(4): 299–320.
- [Min et Jung, 2006]MIN, K. et JUNG, M. (2006). Segmentation of triangular meshes using multi-scale normal variation. *Dans ISVC '06 : International Symposium on Visual Computing*, pages 831–840.
- [Mitani et Suzuki, 2004]MITANI, J. et SUZUKI, H. (2004). Making papercraft toys from meshes using strip-based approximate unfolding. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3):259–263.
- [Mizoguchi *et al.*, 2006]MIZOGUCHI, T., DATE, H., KANAI, S. et KISHINAMI, T. (2006). Segmentation of scanned mesh into analytic surfaces based on robust curvature estimation and region growing. *Dans GMP' 06 : Geometric Modeling and Processing*, pages 644–654, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Moron, 1996]MORON, V. (1996). *Mise en Correspondance de données 3D avec un modèle CAO : Application à l'inspection automatique*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

- [Mortara *et al.*, 2006]MORTARA, M., PATANÉ, G. et SPAGNUOLO, M. (2006). From geometric to semantic human body models. *Computers and Graphics*, 30(2):185–196.
- [Mortara *et al.*, 2004a]MORTARA, M., PATANÉ, G., SPAGNUOLO, M., FALCIDIENO, B. et ROSSIGNAC, J. (2004a). Blowing bubbles for multi-scale analysis and decomposition of triangle meshes. *Algorithmica, Special Issues on Shape Algorithms*, 38(1):227–248.
- [Mortara *et al.*, 2004b]MORTARA, M., PATANÉ, G., SPAGNUOLO, M., FALCIDIENO, B. et ROSSIGNAC, J. (2004b). Plumber : A method for a multi-scale decomposition of 3d shapes into tubular primitives and bodies. *Dans ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pages 139–158.
- [Najman et Couprie, 2003]NAJMAN, L. et COUPRIE, M. (2003). Watershed algorithms and contrast preservation. *Dans DGCI '03 : Proceedings of the 11th International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery*, pages 62–71, Naples, Italy.
- [Najman et Schmitt, 1996]NAJMAN, L. et SCHMITT, M. (1996). Geodesic saliency of watershed contours and hierarchical segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(12):1163–1173.
- [Nealen *et al.*, 2007]NEALEN, A., IGARASHI, T., SORKINE, O. et ALEXA, M. (2007). Fiber-Mesh : Designing freeform surfaces with 3D curves. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH)*, 26(3).
- [Nealen *et al.*, 2005]NEALEN, A., SORKINE, O., ALEXA, M. et COHEN-OR, D. (2005). A sketch-based interface for detail-preserving mesh editing. *ACM Transactions on Graphics*, 24(3):1142–1147.
- [Neves *et al.*, 2003]NEVES, S. R., da SILVA, E. A. B. et MENDOÇA, G. V. (2003). Wavelet-watershed automatic infrared image segmentation method. *Electronics Letters*, 39(12):903–904.
- [Nguyen *et al.*, 2003]NGUYEN, H. T., WORRING, M. et van den BOOMGAARD, R. (2003). Watersnakes : Energy-driven watershed segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(3):330–342.
- [Ni *et al.*, 2004]NI, X., GARLAND, M. et HART, J. C. (2004). Fair morse functions for extracting the topological structure of a surface mesh. *Dans SIGGRAPH '04 : ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pages 613–622, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Nielsen et Nock, 2005]NIELSEN, F. et NOCK, R. (2005). Clickremoval : interactive pinpoint image object removal. *Dans MULTIMEDIA '05 : Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Multimedia*, pages 315–318, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Ohbuchi *et al.*, 2002]OHBUCHI, R., MUKAIYAMA, A. et TAKAHASHI, S. (2002). A frequency-domain approach to watermarking 3d shapes. *Computer Graphics Forum*, 21(3):373–382.

- [Ohtake *et al.*, 2004]OHTAKE, Y., BELYAEV, A. G. et SEIDEL, H.-P. (2004). Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3): 609–612.
- [Page, 2003]PAGE, D. L. (2003). *Part decomposition of 3D surfaces*. Thèse de doctorat, University of Tennessee, Knoxville.
- [Page *et al.*, 2003a]PAGE, D. L., ABIDI, M. A., KOSCHAN, A. et ZHANG, Y. (2003a). Object representation using the minima rule and superquadrics for under vehicle inspection. *Dans Proceedings of the 1st IEEE Latin American Conf. on Robotics and Automation*, pages 91–97, Chile.
- [Page *et al.*, 2003b]PAGE, D. L., KOSCHAN, A. et ABIDI, M. A. (2003b). Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching watersheds. *Dans CVPR '03 : Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 2, pages 27–32.
- [Page *et al.*, 2006]PAGE, D. L., KOSCHAN, A. et ABIDI, M. A. (2006). Linking feature lines on 3d triangle meshes with artificial potential fields. *Dans 3DPVT '06 : Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, University of North Carolina, Chapel Hill, USA.
- [Palágyi *et al.*, 2001]PALÁGYI, K., SORANTIN, E., BALOGH, E., KUBA, A., HALMAI, C., ERDŐHELYI, B. et HAUSEGGER, K. (2001). A sequential 3d thinning algorithm and its medical applications. *Dans IPMI '01 : Proceedings of the 17th International Conference on Information Processing in Medical Imaging*.
- [Papaioannou *et al.*, 2000]PAPAIOANNOU, G., KARABASSI, E.-A. et THEOHARIS, T. (2000). Segmentation and surface characterization of arbitrary 3D meshes for object reconstruction and recognition. *Dans ICPR '00 : Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, page 1734, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Passalis *et al.*, 2004]PASSALIS, G., KAKADIARIS, I. A. et THEOHARIS, T. (2004). Efficient hardware voxelization. *Dans CGI '04 : Proceedings of the Computer Graphics International*, pages 374–377, Crete, Greece. IEEE Computer Society.
- [Peyré et Cohen, 2004]PEYRÉ, G. et COHEN, L. (2004). Surface segmentation using geodesic centroidal tessellation. *Dans 3DPVT '04 : Proceedings of the second IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, pages 995 – 1002, Thessaloniki, Greece.
- [Philipp-Foliguet et Guigues, 2006]PHILIPP-FOLIGUET, S. et GUIGUES, L. (2006). Évaluation de la segmentation : état de l'art, nouveaux indices et comparaison. *Traitement du Signal*, 23(2):109–125.
- [Podolak *et al.*, 2006]PODOLAK, J., SHILANE, P., GOLOVINSKIY, A., RUSINKIEWICZ, S. et FUNKHOUSER, T. (2006). A planar-reflective symmetry transform for 3D shapes. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, 25(3).

- [Pottmann *et al.*, 2004]POTTMANN, H., STEINER, T., HOFER, M., HAIDER, C. et HANBURY, A. (2004). The isophotic metric and its applications to feature sensitive morphology on surfaces. *Dans ECCV '04 : Proceedings of the 8th European Conference on Computer Vision*, volume 3024, pages 560–572, Prague, Czech Republic.
- [Prêteux, 1992]PRÊTEUX, F. J. (1992). Watershed and skeleton by influence zones : A distance-based approach. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 1(3):239–255.
- [Prêteux, 1993]PRÊTEUX, F. J. (1993). On a distance function approach for gray-level mathematical morphology. *Dans DOUGHERTY, E. R., éditeur : Mathematical Morphology in Image Processing*, chapitre 10, pages 323–349. CRC Press, New York, USA.
- [Pulla *et al.*, 2001]PULLA, S., RAZDAN, A. et FARIN, G. (2001). Improved curvature estimation for watershed segmentation of 3-dimensional meshes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (submitted for publication)*.
- [Qin *et al.*, 2006]QIN, A.-h., XIONG, H., PENG, H.-y., LIU, Z. et SHI, J.-y. (2006). Cluster parallel rendering based on encoded mesh. *Journal of Zhejiang University - Science A*, 7(7):1124–1133.
- [Raab *et al.*, 2004]RAAB, R., GOTSMAN, C. et SHEFFER, A. (2004). Virtual woodwork : Making toys from geometric models. *International Journal on Shape Modeling*, 10(1):1–30.
- [Razdan et Bae, 2003]RAZDAN, A. et BAE, M. (2003). A hybrid approach to feature segmentation of triangle meshes. *Computer-Aided Design*, 35(9):783–789.
- [Rea *et al.*, 2004]REA, H. J., CLARK, D. E. R., CORNEY, J. R. et TAYLOR, N. K. (2004). A surface partitioning spectrum (SPS) for retrieval and indexing of 3D CAD models. *Dans 3DPVT '04 : Proceedings of the second IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, pages 167–174, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Reniers et Telea, 2007]RENIERS, D. et TELEA, A. (2007). Skeleton-based hierarchical shape segmentation. *Dans SMI '07 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 179–188, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Reniers et Telea, 2008]RENIERS, Dennieand van Wijk, J. et TELEA, A. (2008). Computing multiscale curve and surface skeletons of genus 0 shapes using a global importance measure. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Accepted for future publication.
- [Rettmann *et al.*, 2002]RETTMANN, M. E., HAN, X., XU, C. et PRINCE, J. L. (2002). Automated sulcal segmentation using watersheds on the cortical surface. *NEUROIMAGE*, 15:329–344.

- [Roberts, 1997]ROBERTS, S. J. (1997). Parametric and non-parametric unsupervised cluster analysis. *Pattern Recognition*, 30(2):261–272.
- [Roerdink et Meijster, 1997]ROERDINK, J. B. et MEIJSTER, A. (1997). Segmentation by watersheds : Definition and parallel implementation. Dans F. SOLINA, W.G. Kropatsch, R. K. et BAJCSY, R., éditeurs : *Advances in Computer Vision*, pages 21–30. Springer.
- [Roerdink et Meijster, 2001]ROERDINK, J. B. et MEIJSTER, A. (2001). The watershed transform : Definitions, algorithms and parallelization techniques. *Fundamenta Informaticae*, 41(1-2):187–228.
- [Rondão Alface, 2006]RONDÃO ALFACE, P. (2006). *Perception and Re-Synchronization Issues for the Watermarking of 3D Shapes*. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain.
- [Rondão Alface et al., 2007]RONDÃO ALFACE, P., MACQ, B. et CAYRE, F. (2007). Blind and robust watermarking of 3d models : How to withstand the cropping attack ? Dans *ICIP '07 : Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 5, pages 465–468, San Antonio, Texas, USA.
- [Roudet et al., 2007]ROUDET, C., DUPONT, F. et BASKURT, A. (2007). Multiresolution mesh segmentation based on surface roughness and wavelet analysis. Dans *VCIP'07 : SPIE Visual Communications and Image Processing*, volume 6508.
- [Sander et al., 2001]SANDER, P. V., SNYDER, J., GORTLER, S. J. et HOPPE, H. (2001). Texture mapping progressive meshes. Dans *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 409–416, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Sander et al., 2003]SANDER, P. V., WOOD, Z. J., GORTLER, S. J., SNYDER, J. et HOPPE, H. (2003). Multi-chart geometry images. Dans *SGP '03 : Symposium on Geometry Processing*, pages 146–155.
- [Sattler et al., 2005]SATTLE, M., SARLETTE, R. et KLEIN, R. (2005). Simple and efficient compression of animation sequences. Dans *SCA '05 : Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 209–217, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Schmitt, 1998]SCHMITT, M. (1998). Response to the comment on "geodesic saliency of watershed contours and hierarchical segmentation". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(7):764–766.
- [Sebastian et al., 2004]SEBASTIAN, T. B., KLEIN, P. N. et KIMIA, B. B. (2004). Recognition of shapes by editing their shock graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(5):550–571.
- [Serra, 2000]SERRA, J. (2000). Skiz et Ligne de partage des eaux. Course on Mathematic Morphology, (Chapitre IX). École des Mines de Paris.

- [Sethian, 1996]SETHIAN, J. A. (1996). A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. *Dans PNAS '96 : Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, volume 93, pages 1591–1595.
- [Sethian, 1999]SETHIAN, J. A. (1999). *Level set methods and fast marching methods : evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science*. Cambridge University Press.
- [Shamir, 2004]SHAMIR, A. (2004). A formulation of boundary mesh segmentation. *Dans 3DPVT '04 : Proceedings of the second IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, pages 82–89, Greece.
- [Shamir, 2006]SHAMIR, A. (2006). Segmentation and shape extraction of 3D boundary meshes. *Dans State-of-the-Art Report, Proceedings Eurographics 2006*, pages 137–149, Vienna, Austria.
- [Shamir et al., 2005]SHAMIR, A., COHEN-OR, D. et SHAPIRA, L. (2005). Consistent partitioning of meshes. Rapport technique, Tel-Aviv University.
- [Shamir et al., 2006]SHAMIR, A., SHAPIRA, L. et COHEN-OR, D. (2006). Mesh analysis using geodesic mean-shift. *The Visual Computer : International Journal of Computer Graphics*, 22(2):99–108.
- [Shamir et al., 2004]SHAMIR, A., SHAPIRA, L., COHEN-OR, D. et GOLDENTHAL, R. (2004). Geodesic mean shift. *Dans Proceedings of the 5th Korea Israel conference on Geometric Modeling and Computer Graphics*, pages 51–56.
- [Shapira et al., 2007]SHAPIRA, L., SHAMIR, A. et COHEN-OR, D. (2007). Consistent mesh partitioning and skeletonization using the shape diameter function. *The Visual Computer, Special IK issue*.
- [Sharf et al., 2007]SHARF, A., LEWINER, T., SHAMIR, A. et KOBBELT, L. P. (2007). On-the-fly curve-skeleton computation for 3d shapes. *Dans Eurographics*, Prague.
- [Sheffer, 2001]SHEFFER, A. (2001). Model simplification for meshing using face clustering. *Computer-Aided Design*, 33(13):925–934.
- [Sheffer et al., 1997]SHEFFER, A., BLACKER, T., CLEMENTS, J. et BERCOVIER, M. (1997). Virtual topology operators for meshing. *Dans Proceedings, 6th International Meshing Roundtable*, pages 49–66, Park City, Utah.
- [Sheffer et al., 2007]SHEFFER, A., PRAUN, E. et ROSE, K. (2007). Mesh parameterization methods and their applications. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision (FTCGV)*, 2(2):64.
- [Shi et Malik, 2000]SHI, J. et MALIK, J. (2000). Normalized cuts and image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(8):888–905.
- [Shilane et al., 2004]SHILANE, P., MIN, P., KAZHDAN, M. et FUNKHOUSER, T. (2004). The princeton shape benchmark. *Dans SMI '04 : Proceedings of the International*

- Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 167–178, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Shlafman *et al.*, 2002]SHLAFMAN, S., TAL, A. et KATZ, S. (2002). Metamorphosis of polyhedral surfaces using decomposition. *Computer Graphics Forum*, 21(3):219–228.
- [Siddiqi *et al.*, 1999]SIDDIQI, K., SHOKOUFANDEH, A., DICKINSON, S. J. et ZUCKER, S. W. (1999). Shock graphs and shape matching. *International Journal of Computer Vision*, 35(1):13–32.
- [Simari *et al.*, 2006]SIMARI, P. D., KALOGERAKIS, E. et SINGH, K. (2006). Folding meshes : Hierarchical mesh segmentation based on planar symmetry. *Dans SGP '06 : Proceedings of the fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing*, Sardinia, Italy.
- [Simari et Singh, 2005]SIMARI, P. D. et SINGH, K. (2005). Extraction and remeshing of ellipsoidal representations from mesh data. *Dans GI '05 : Proceedings of the 2005 conference on Graphics interface*, pages 161–168. Canadian Human-Computer Communications Society.
- [Singh *et al.*, 1999]SINGH, M., SEYRANIAN, G. D. et HOFFMAN, D. D. (1999). Parsing silhouettes : The short-cut rule. *Perception and Psychophysics*, 61(4):636–660.
- [Sorkine *et al.*, 2002]SORKINE, O., COHEN-OR, D., GOLDENTHAL, R. et LISCHINSKI, D. (2002). Bounded-distortion piecewise mesh parameterization. *Dans VIS '02 : Proceedings of the conference on Visualization*, pages 355–362, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Spagnuolo *et al.*, 2006]SPAGNUOLO, M., BIASOTTI, S., FALCIDIENO, B. et MARINI, S. (2006). Structural descriptors for 3D shapes. *Dans CRAWFORD, T. et VELTKAMP, R. C., éditeurs : Content-Based Retrieval*, numéro 06171.
- [Sun *et al.*, 2002]SUN, Y., PAGE, D. L., PAIK, J. K., KOSCHAN, A. et ABIDI, M. A. (2002). Triangle mesh-based edge detection and its application to surface segmentation and adaptive surface smoothing. *Dans ICIP '02 : Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 3, pages 825–828, Rochester, NY.
- [Symonova et De Amicis, 2007]SYMONOVA, O. et DE AMICIS, R. (2007). Shape segmentation for shape description. *Dans IADIS International Conference on Computer Graphics and Visualization*, Lisbon, Portugal.
- [Tal et Zuckerberger, 2006]TAL, A. et ZUCKERBERGER, E. (2006). Mesh retrieval by components. *Dans GRAPP '06 : International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, pages 142–149.
- [Tan et Ahuja, 2001]TAN, K.-H. et AHUJA, N. (2001). Selecting objects with freehand sketches. *Dans ICCV '01 : Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, volume 1, pages 337–344, Vancouver, BC, Canada.

- [Tangelder et Veltkamp, 2004]TANGELDER, J. W. H. et VELTKAMP, R. C. (2004). A survey of content based 3D shape retrieval methods. *Dans SMI '04 : Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 145–156, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Taubin, 1995]TAUBIN, G. (1995). Estimating the tensor of curvature of a surface from a polyhedral approximation. *Dans ICCV '95 : Proceedings of the fifth International Conference on Computer Vision*, pages 902–907, Cambridge, MA , USA.
- [Thirion, 1996]THIRION, J.-P. (1996). The extremal mesh and the understanding of 3D surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 19(2):115–128.
- [Tierny *et al.*, 2006]TIERNY, J., VANDEBORRE, J.-P. et DAOUDI, M. (2006). 3D mesh skeleton extraction using topological and geometrical analyses. *Dans PG '06 : Proceedings of the 14th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages 85–94, Taipei, Taiwan.
- [Tierny *et al.*, 2007]TIERNY, J., VANDEBORRE, J.-P. et DAOUDI, M. (2007). Topology driven 3D mesh hierarchical segmentation. *Dans SMI' 07 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 215–220, Lyon, France.
- [Tung, 2005]TUNG, T. (2005). *Indexation 3D de bases de données d'objets par graphes de Reeb améliorés*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris.
- [Valette *et al.*, 2005]VALETTE, S., KOMPATSIARIS, I. et STRINTZIS, M. G. (2005). A polygonal mesh partitioning algorithm based on protrusion conquest for perceptual 3D shape description. *Dans SVE '05 : Workshop towards Semantic Virtual Environments*, pages 68–76, Villars, Switzerland.
- [Várady *et al.*, 2007]VÁRADY, T., FACELLO, M. A. et TERÉK, Z. (2007). Automatic extraction of surface structures in digital shape reconstruction. *Computer-Aided Design*, 39(5):379–388.
- [Várady *et al.*, 1997]VÁRADY, T., MARTIN, R. R. et COX, J. (1997). Reverse engineering of geometric models - an introduction. *Computer-Aided Design*, 29(4):255–268.
- [Vieira et Shimada, 2005]VIEIRA, M. et SHIMADA, K. (2005). Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing. *Computer Aided Geometric Design*, 22(8):771–792.
- [Vincent, 1989]VINCENT, L. (1989). Graphs and mathematical morphology. *Signal Processing*, 16(4):365–388.
- [Vincent et Soille, 1991]VINCENT, L. et SOILLE, P. (1991). Watersheds in digital spaces : An efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6):583–598.

- [Vinet, 1991]VINET, L. (1991). *Segmentation et mise en correspondance de regions de paires d'images stereoscopiques*. Thèse de doctorat, Université Paris IX - Dauphine.
- [Werghi, 2006]WERGHI, N. (2006). A robust approach for constructing a graph representation of articulated and tubular-like objects from 3D scattered data. *Pattern Recognition Letters*, 27(6):643–651.
- [Willmott *et al.*, 1999]WILLMOTT, A., HECKBERT, P. S. et GARLAND, M. (1999). Face cluster radiosity. *Dans Eurographics Workshop on Rendering*, pages 293–304.
- [Wu et Kobbelt, 2005]WU, J. et KOBBELT, L. P. (2005). Structure recovery via hybrid variational surface approximation. *Computer Graphics Forum*, 24(3):277–284.
- [Wu et Levine, 1997]WU, K. et LEVINE, M. D. (1997). 3D part segmentation using simulated electrical charge distributions. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(11):1223–1235.
- [Yamauchi *et al.*, 2005a]YAMAUCHI, H., GUMHOLD, S., ZAYER, R. et SEIDEL, H.-P. (2005a). Mesh segmentation driven by gaussian curvature. *The Visual Computer*, 21(8-10):649–658.
- [Yamauchi *et al.*, 2005b]YAMAUCHI, H., LEE, S., LEE, Y., OHTAKE, Y., BELYAEV, A. G. et SEIDEL, H.-P. (2005b). Feature sensitive mesh segmentation with mean shift. *Dans SMI '05 : Proceedings of the Shape Modeling International*, pages 236–243, Cambridge, MA, USA. IEEE.
- [Yamazaki *et al.*, 2006]YAMAZAKI, I., NATARAJAN, V., BAI, Z. et HAMANN, B. (2006). Segmenting point sets. *Dans SMI '06 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 4–13, Matsushima, Japan.
- [Yan *et al.*, 2006]YAN, D.-M., LIU, Y. et WANG, W. (2006). Quadric surface extraction by variational shape approximation. *Dans GMP '06 : Proceedings of the 4th International Conference on Geometric Modeling and Processing*, pages 73–86, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A.
- [Yasnoff *et al.*, 1977]YASNOFF, W. A., MUI, J. K. et BACUS, J. W. (1977). Error measures for scene segmentation. *Pattern Recognition*, 9(4):217–231.
- [Yoshizawa *et al.*, 2007]YOSHIZAWA, S., BELYAEV, A. G., HIDEO, Y. et SEIDEL, H.-P. (2007). Fast and faithful geometric algorithm for detecting crest lines on meshes. *Dans PG '07 : Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, Maui, Hawaii.
- [Yoshizawa *et al.*, 2005]YOSHIZAWA, S., BELYAEV, A. G. et SEIDEL, H.-P. (2005). Fast and robust detection of crest lines on meshes. *Dans SPM '05 : Proceedings of the 2005 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*, pages 227–232, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Yu et Shi, 2004]YU, S. X. et SHI, J. (2004). Segmentation given partial grouping constraints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(2):173–183.

- [Zaharia et Prêteux, 2004]ZAHARIA, T. B. et PRÊTEUX, F. J. (2004). Descripteurs de forme : Etude comparée des approches 3D et 2D/3D. *Dans RFIA '04 : Actes de 14ème Congrès Francophone de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, Toulouse.
- [Zhang et al., 2005]ZHANG, E., MISCHAIKOW, K. et TURK, G. (2005). Feature-based surface parameterization and texture mapping. *ACM Transactions on Graphics*, 24(1):1–27.
- [Zhang et al., 2008]ZHANG, H., FRITTS, J. E. et GOLDMAN, S. A. (2008). Image segmentation evaluation : A survey of unsupervised methods. *Computer Vision and Image Understanding*. (Accepted Manuscript).
- [Zhang et Liu, 2005]ZHANG, H. et LIU, R. (2005). Mesh segmentation via recursive and visually salient spectral cuts. *Dans VMV '05 : Vision, Modeling and Visualization*, pages 429–436, Erlangen, Germany.
- [Zhang et al., 2004]ZHANG, Y., KOSCHAN, A. et ABIDI, M. A. (2004). Superquadric representation of automotive parts applying part decomposition. *Journal of Electronic Imaging, Special Issue on Quality Control by Artificial Vision*, 13(3):411–417.
- [Zhang et al., 2002]ZHANG, Y., PAIK, J. K., KOSCHAN, A., ABIDI, M. A. et GORSICH, D. (2002). A simple and efficient algorithm for part decomposition of 3D triangulated models based on curvature analysis. *Dans ICIP '02 : Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 3, pages 273–276, Rochester.
- [Zhao et al., 2006]ZHAO, M., MA, L. et YONG, Z. (2006). Mesh cutout. *IEICE - Transactions on Information and Systems*, E89-D(7):2207–2213.
- [Zhou et al., 2004]ZHOU, K., SYNDER, J., GUO, B. et SHUM, H.-Y. (2004). Iso-charts : stretch-driven mesh parameterization using spectral analysis. *Dans SGP '04 : Proceedings of the second Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, pages 45–54, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Zhou et Huang, 2004]ZHOU, Y. et HUANG, Z. (2004). Decomposing polygon meshes by means of critical points. *Dans MMM '04 : Proceedings of the 10th International Multimedia Modelling Conference*, page 187, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Zöckler et al., 2000]ZÖCKLER, M., STALLING, D. et HEGE, H.-C. (2000). Fast and intuitive generation of geometric shape transitions. *The Visual Computer*, 16(5):241–253.
- [Zuckerberger et al., 2002]ZUCKERBERGER, E., TAL, A. et SHLAFMAN, S. (2002). Polyhedral surface decomposition with applications. *Computers and Graphics*, 26(5):733–743.

# Annexe A

## Construction hiérarchique des partitions

### A.1 Fusion à partir de la profondeur de la LPE

La fusion des régions issues de la LPE 3D a été proposée par [Mangan et Whitaker, 1999]. L'exemple suivant (figures A.2 et A.3) décrit toutes les étapes de fusion selon la profondeur de la LPE pour aboutir à une seule partition. La figure A.1 correspond à l'arbre de fusion à partir duquel un niveau de segmentation peut être calculé. Ces niveaux se déterminent à partir du numéro de région (compris dans l'exemple entre  $R_7$  et  $R_{13}$ ). Le choix de la région implique la fusion de toutes les régions filles associées à une région parente de numéro immédiatement inférieur (ou égal) au numéro de la région choisie. La région  $R_7$  est associée à un niveau pour signifier qu'il n'y a pas de fusion ; elle correspond au niveau 0.

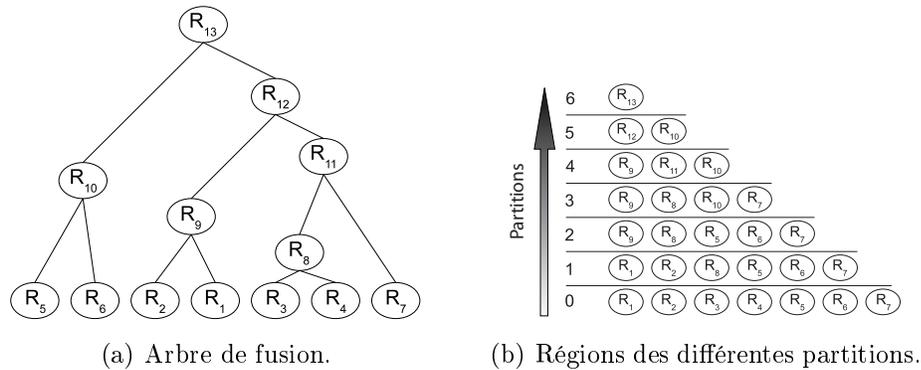


FIG. A.1 – Arbre de fusion pour la profondeur de la LPE.

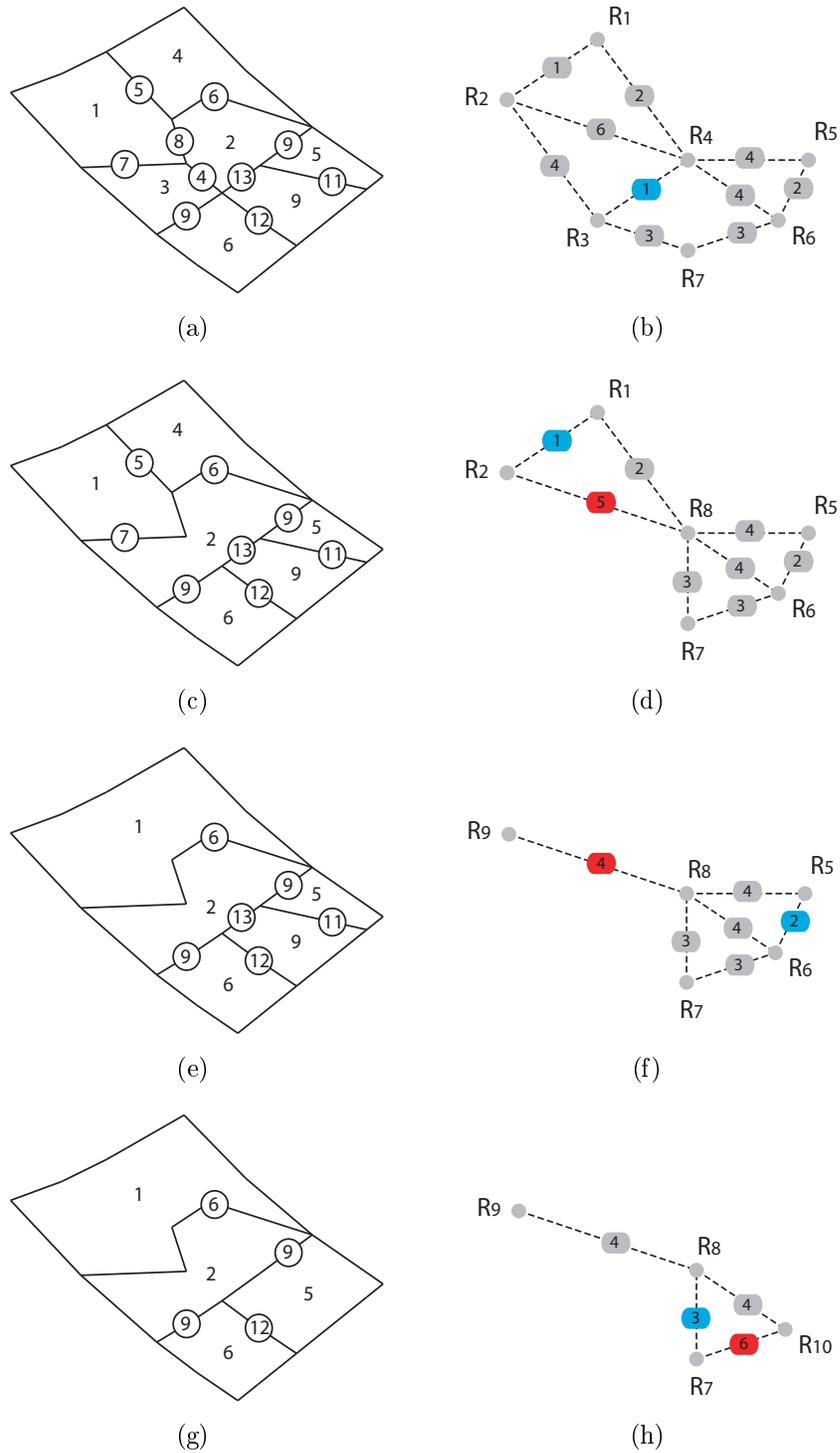


FIG. A.2 – Partitions à chaque itération de la fusion. Les partitions ainsi que les minima des bassins et les hauteurs des points selles apparaissent à gauche, les graphes duaux avec les profondeurs de la LPE sont à droite.

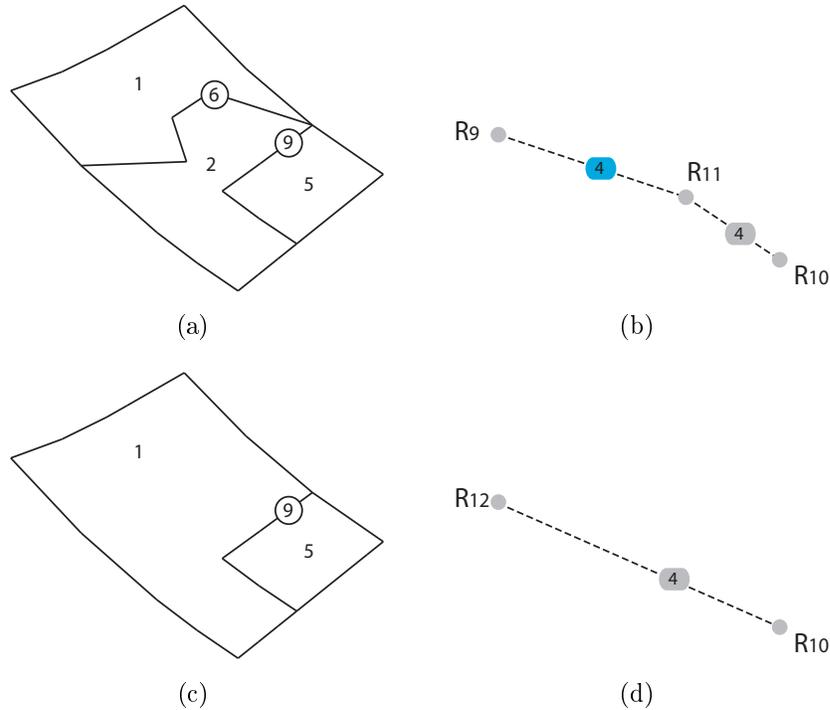
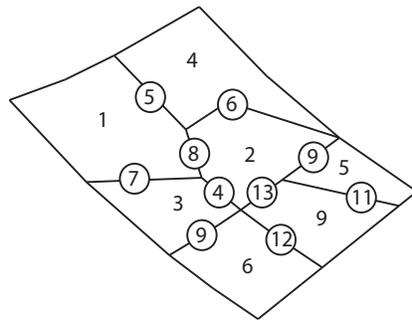


FIG. A.3 – Suite du processus de fusion à partir de la profondeur de la LPE.

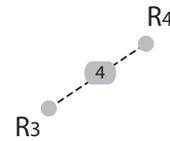
Les profondeurs de LPE qui apparaissent en rouge correspondent aux nouvelles valeurs issues de la mise à jour du minimum du bassin de la région. Les arcs marqués en bleus vont être supprimés à la prochaine itération. La figure A.2(d) montre par exemple la nouvelle profondeur de la LPE calculée à partir de la différence entre la valeur 7 du point selle et la valeur maximum des minima des bassins adjacents ( $\max(1, 2) = 2$ ). A l'itération précédente, cette valeur était de 3 pour la région  $R_3$ ; en raison de la fusion des régions  $R_3$  et  $R_4$ , le minimum est devenu 2. Il ne peut être conservé qu'un seul point selle par frontière. S'il y a un choix à faire, le point selle le plus faible est conservé.

## A.2 Fusion à partir des cascades

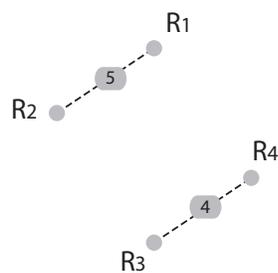
Les cascades font intervenir la hauteur des points selles comme critère de fusion, contrairement à la méthode précédente qui utilise la profondeur de la LPE. La méthode des cascades à partir des graphes utilise l'arbre de poids minimum et réalise la LPE sur ce nouveau graphe. Les arcs du graphe dual de la partition sont parcourus dans l'ordre croissant et la création des arcs du nouveau graphe ne peut s'effectuer que si les régions à ajouter ne l'ont pas déjà été. La figure A.4 représente un exemple de construction de l'arbre de poids minimum.



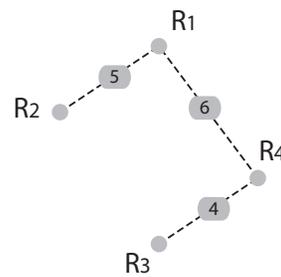
(a) Partition issue de la LPE, minima des bassins et points selles.



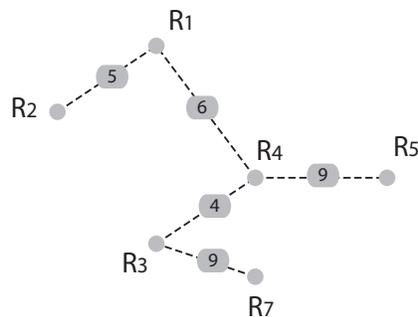
(b) Création du premier arc de l'arbre de poids minimum.



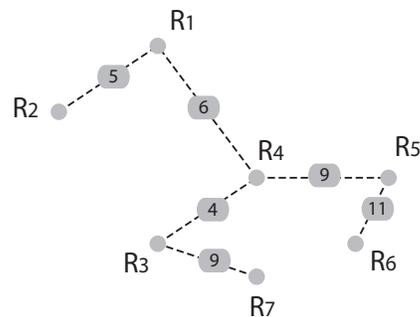
(c)



(d)



(e)



(f)

FIG. A.4 – Création de l'arbre de poids minimum.

Une fois que cet arbre est construit, la LPE peut être utilisée pour labelliser les arcs et par conséquent les régions associées aux arcs. Les sources d'inondation correspondent aux arcs qui n'ont pas d'arc voisin de plus faible valeur. Dès lors que les minima locaux ont été définis, la croissance peut s'opérer sur l'arbre de poids minimum. Le procédé revient à tester et labelliser les arcs dans l'ordre croissant de leur valeur. Si un arc relie deux régions nouvellement créées, il conserve son statut de frontière. A la fin de la première itération des cascades (figure A.5(e)), la partition donnée en exemple ne compte plus que deux régions. Comme dans la méthode précédente, le procédé de fusion

peut correspondre au seuillage de la profondeur de la LPE ou bien au stockage de tous les niveaux de segmentation dans un arbre. La deuxième solution est à privilégier car le nombre de niveaux reste raisonnable, même dans le cas de modèle possédant un nombre élevé de vertex.

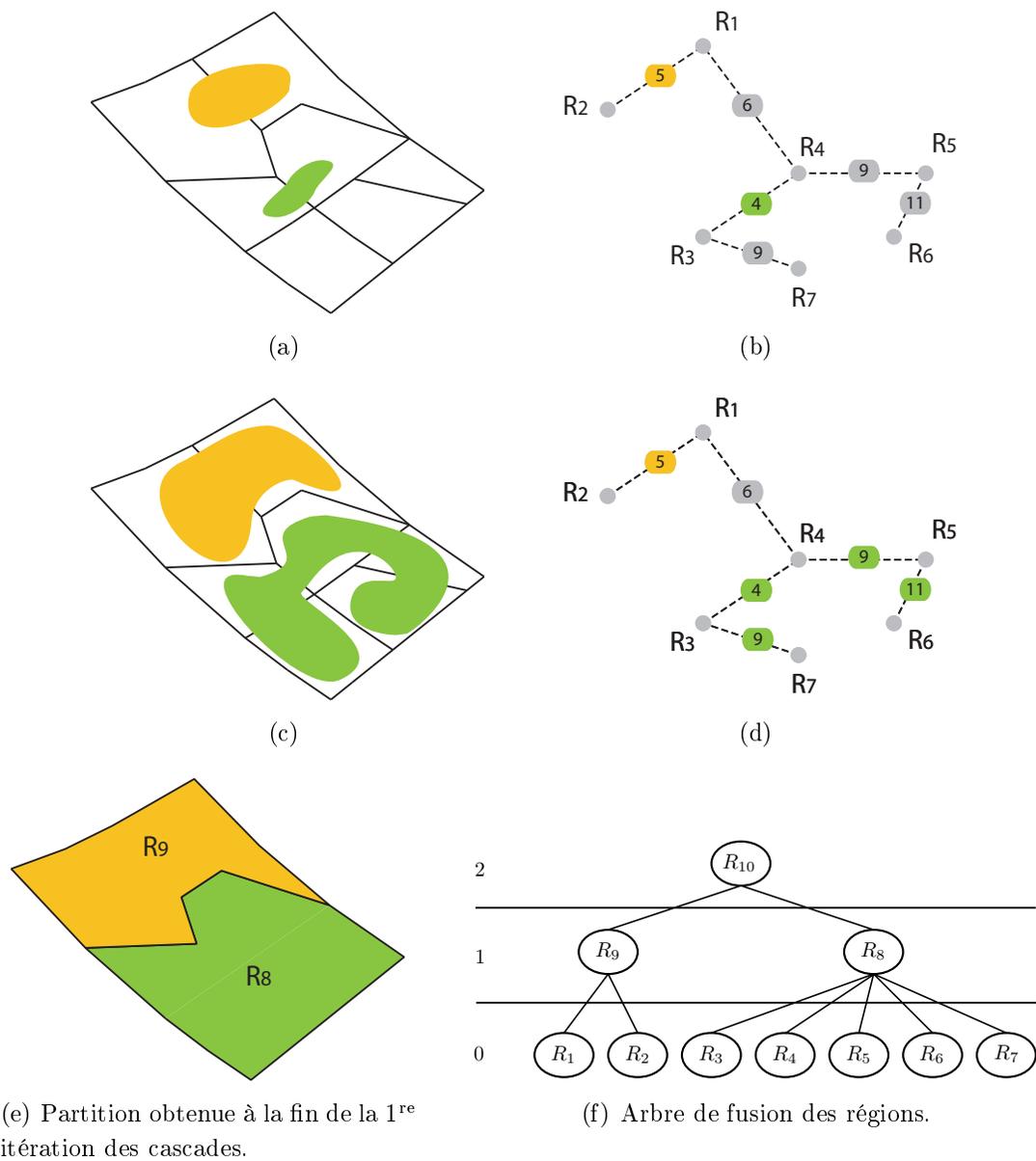
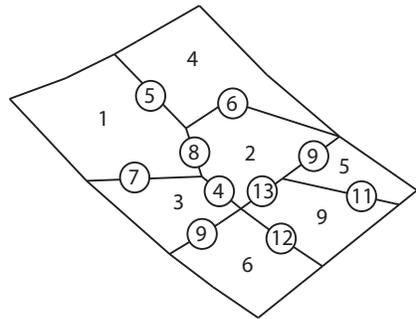


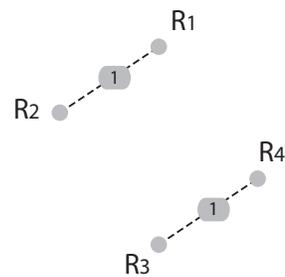
FIG. A.5 – Segmentation hiérarchique à partir des cascades.

### A.3 Combinaison des cascades et de la profondeur de la LPE

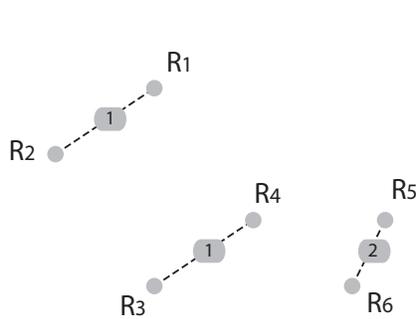
Les cascades peuvent être utilisées en considérant la profondeur de la LPE comme hauteur de frontière et non pas la hauteur des points selles. La création de l'arbre de poids minimum est différente de celle proposée à la section précédente car la fusion des régions entraîne une modification de hauteur des frontières. La construction de l'arbre fait intervenir le procédé d'inondation des figures A.3 et A.4.



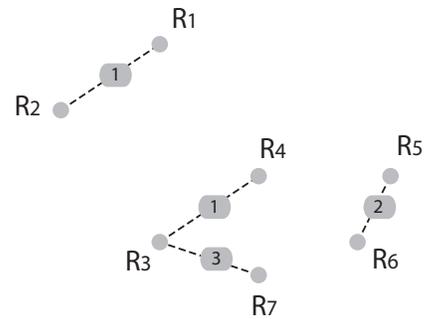
(a) Partition issue de la LPE, minima des bassins et points selles.



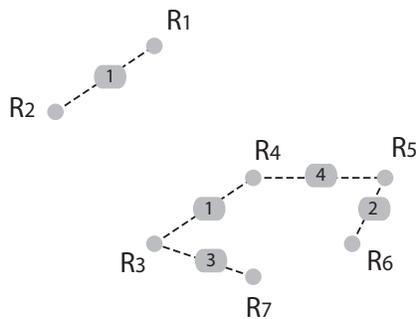
(b) Création des premiers arcs de l'arbre de poids minimum.



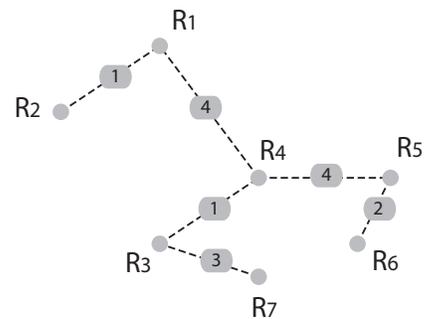
(c) .



(d) .



(e) .



(f) .

FIG. A.6 – Création de l'arbre de poids minimum.

L'arbre de poids minimum fait apparaître trois minima et non pas deux comme à la section précédente. L'algorithme privilégie la fusion lorsque la différence entre la hauteur d'un point selle et le maximum des minima des bassins voisins est faible plutôt que la hauteur absolue des points selles. La région  $R_{10}$  est créée par la fusion des régions  $R_5$  et  $R_6$ . La frontière qui séparent ces deux régions a une profondeur de LPE équivalente à 2 qui est un minimum local sur l'arbre de poids minimum.

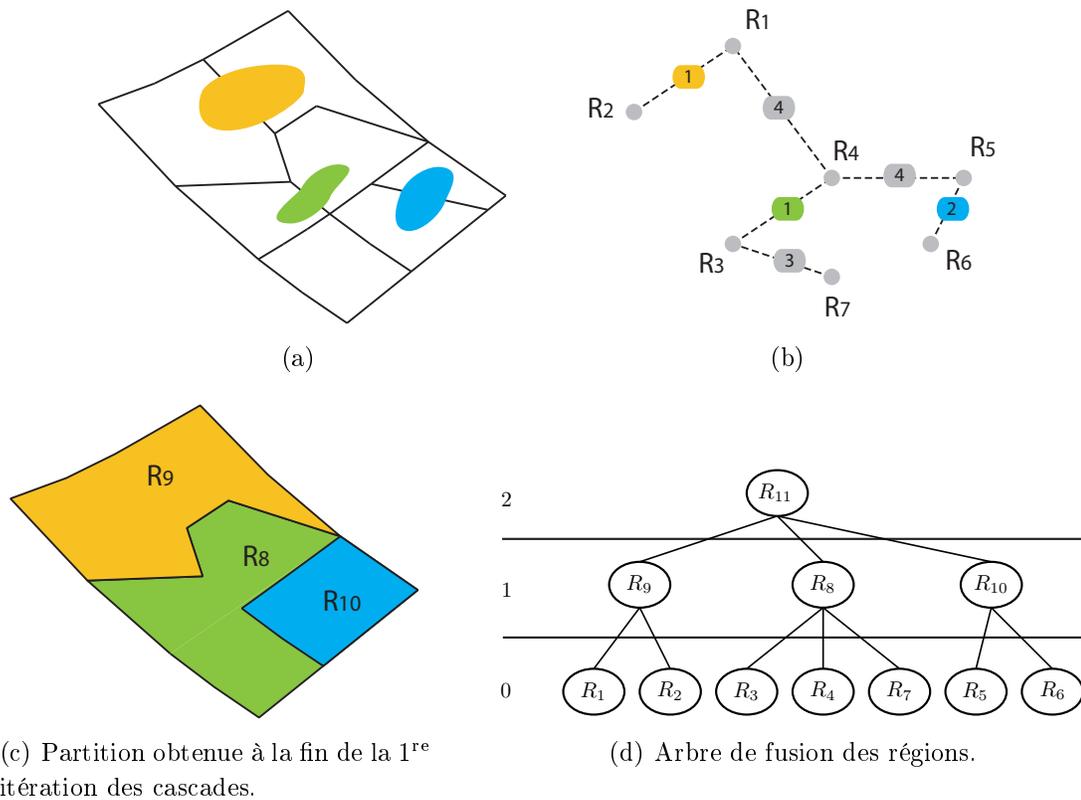
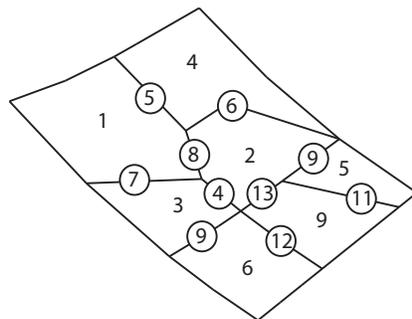


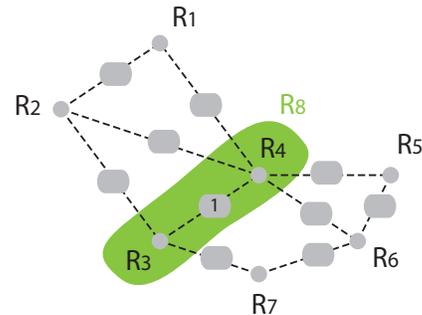
FIG. A.7 – Segmentation hiérarchique à partir des cascades avec le critère de profondeur de LPE.

## A.4 Fusion à partir des dynamiques de contour

Les dynamiques de contour ont été abordées à la section 3.3.3. La figure A.8 illustre l'intégralité du schéma de calcul des dynamiques de contour sur la partition donnée dans les exemples précédents. La méthode de [Lemaréchal *et al.*, 1998] a été utilisée pour calculer les dynamiques de contour. A partir de la partition générée par la LPE, les minima des bassins ainsi que les points selles et leur hauteur sont déterminés. Les points selles sont rangés par ordre croissant dans une liste de sorte à ce que chaque point selle retiré corresponde au plus petit dans la liste. En considérant le graphe de la partition avec des arcs valués à partir de la hauteur des points selles, l'arc reliant les régions  $R_3$  et  $R_4$  est sélectionné le premier. Sa dynamique est calculée directement à partir de la profondeur de la LPE ; elle correspond donc ici à  $4 - \max(3, 2) = 1$ . Ce procédé de sélection par ordre croissant peut être vu comme une inondation reliant deux bassins lorsque le niveau d'eau atteint le point selle. Cette inondation a atteint ici le niveau 4 et entraîne la création d'une nouvelle région  $R_8$  à partir de la fusion de  $R_3$  et  $R_4$ .



(a) Partition issue de la LPE



(b) Début de l'inondation : sélection du point selle le plus faible et calcul de la première dynamique de contour.

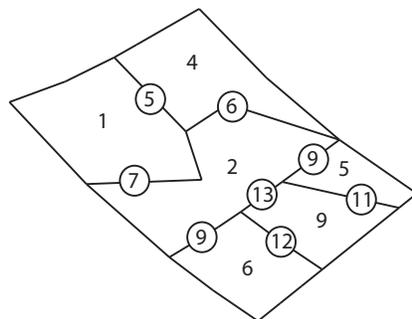
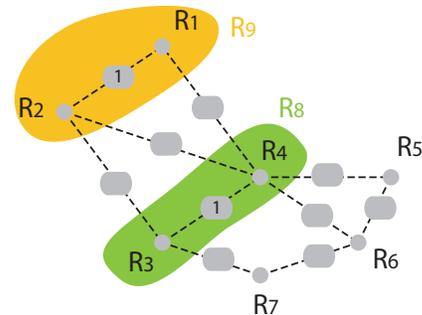
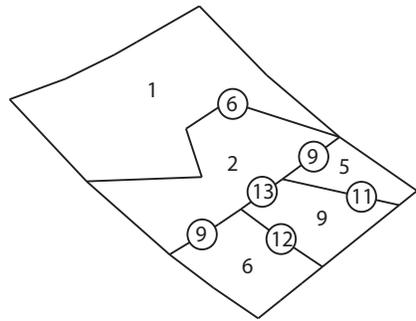
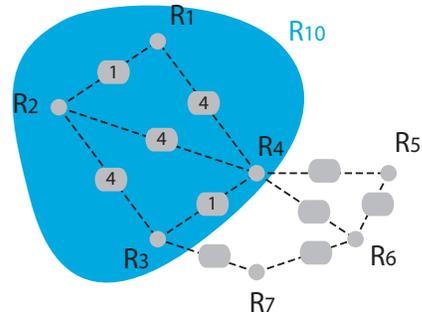
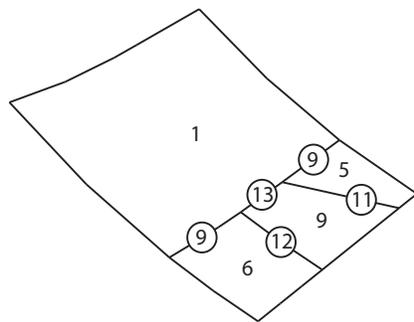
(c) L'eau a atteint la hauteur de 4, les bassins  $R_3$  et  $R_4$  sont fusionnés.(d) Au niveau 5, la dynamique du contour  $\{R_1, R_2\}$  est créée.

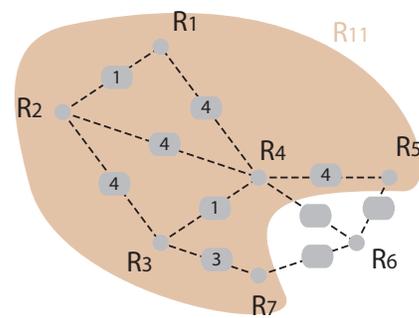
FIG. A.8 – Création des dynamiques de contour.



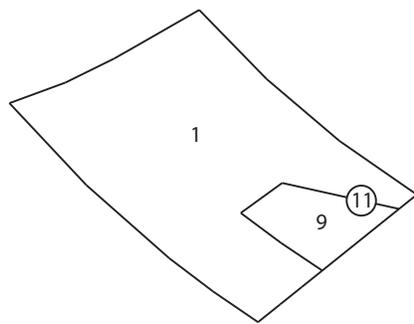
(e) Fusion des régions au niveau 5.

(f) Au niveau 6,  $R_{10}$  est formée et tous les arcs qui relient ses régions filles  $R_8$  et  $R_9$  obtiennent une dynamique de 4.

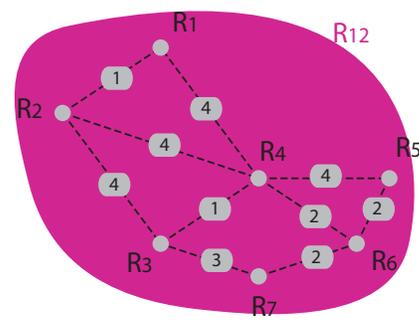
(g) Fusion des régions au niveau 6.



(h) Inondation au niveau 9.



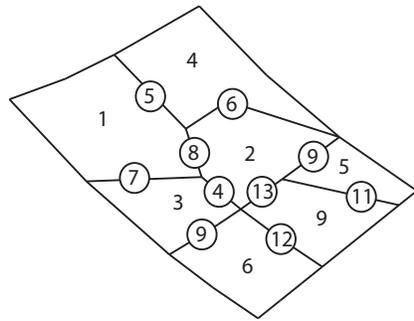
(i) Fusion des régions au niveau 9.



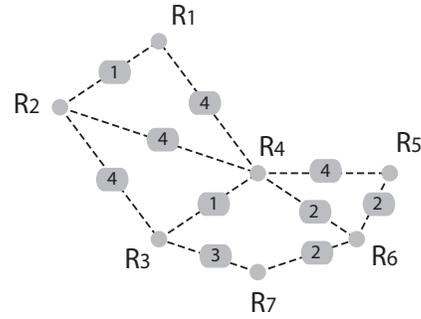
(j) Inondation au niveau 11.

FIG. A.8 – Création des dynamiques de contour.

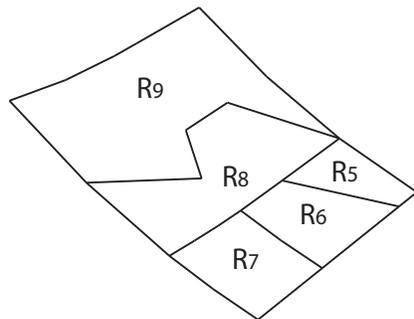
Les différents seuillages appliqués aux dynamiques de contour génèrent les partitions des figures A.9(c) et A.9(e). Il est possible de réaliser une segmentation hiérarchique à partir des cascades en utilisant les dynamiques de contour à la place de la « hauteur » des points selles. Dans l'exemple actuel, l'approche des cascades combinée aux dynamiques de contour conduit au même résultat que la figure A.5.



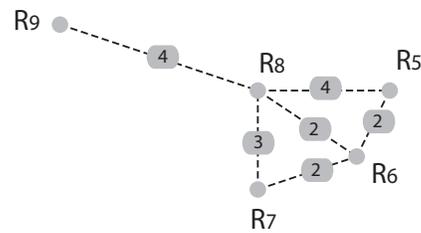
(a) Partition issue de la LPE



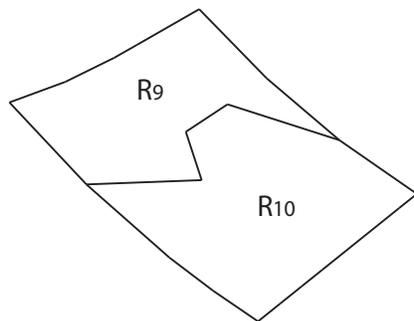
(b) Dynamiques de contour



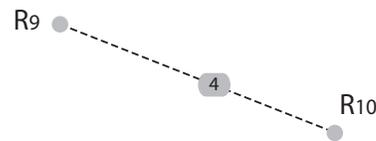
(c)  $seuil = 1$



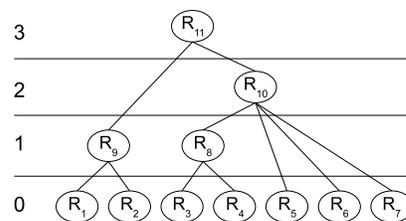
(d)



(e)  $seuil = 2$



(f)



(g) Arbre de fusion.

FIG. A.9 – Seuillage des dynamiques de contour.

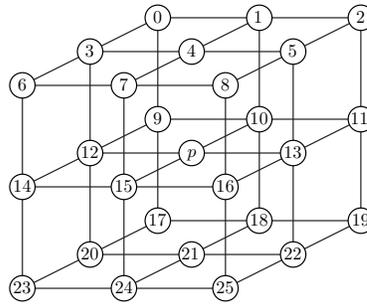
# Annexe B

## La squelettisation

Nous avons pu voir à la section 5.2.2 (page 144) un algorithme de squelettisation basé sur la suppression successive des points simples. Pour déterminer si les voisins noirs d'un point  $p$  sont *26-connectés*, il est possible d'utiliser des tableaux contenant, pour chaque voisin, la liste des précédents points qui lui sont connectés.

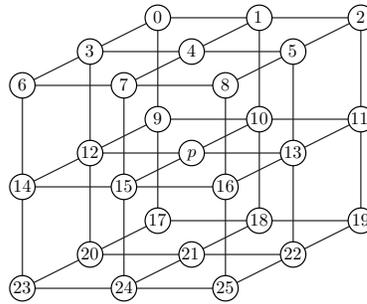
Les listes  $S26[i]$  des points  $i$  *26-connectés* sont faciles à établir et peuvent être programmées simplement. L'ordre de parcours des points est important pour les algorithmes COND\_2\_SATISFAITE et COND\_4\_SATISFAITE. Dans le cas du premier algorithme, le parcours des points peut suivre l'ordre croissant de 0 à 25 ; dans le cas du deuxième, il est important de modifier cet ordre car, le seul précédent direct de 3 est 4 et le précédent direct de 9 est 10. Les ordres ainsi que les listes comprenant les prédécesseurs de chaque point sont données dans les tableaux B.1, B.2 et B.3.

Les listes  $S18[indice]$  des points  $j$  *6-connectés* de  $N_p(18)$  est moins évidente à établir. *indice* correspond ici à un indice de la liste  $S18$  compris entre 0 et 17.  $i$  et  $j$  correspondent à un numéro de point compris entre 0 et 25. Chaque point est lié à un ou plusieurs points *6-connectés* de numéro inférieur à l'exception des points 3 et 9.



Point	Listes $S_{26}$ des prédécesseurs $26$ -connectés											
0												
1	0											
2	1											
3	0	1										
4	0	1	2	3								
5	1	2	4									
6	3	4										
7	3	4	5	6								
8	4	5	7									
9	0	1	3	4								
10	0	1	2	3	4	5	9					
11	1	2	4	5	10							
12	0	1	3	4	6	7	9	10				
13	1	2	4	5	7	8	10	11				
14	3	4	6	7	12							
15	3	4	5	6	7	8	12	13	14			
16	4	5	7	8	13	15						
17	9	10	12									
18	9	10	11	12	13	17						
19	10	11	13	18								
20	9	10	12	14	15	17	18					
21	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
22	10	11	13	15	16	18	19	21				
23	12	14	15	20	21							
24	12	13	14	15	16	20	21	22	23			
25	13	15	16	21	22	24						

TAB. B.1 – Listes  $S_{26}$  des prédécesseurs  $26$ -connectés.



Point	Liste S18	
1		
4	1	
3	4	
5	4	
7	4	
10	1	
9	10	
11	10	
12	3	9
13	5	11
14	12	
15	7	14
16	13	15
18	10	
20	12	
21	18	20
22	13	21
24	15	21

TAB. B.2 – Liste S18 des prédécesseurs 6-connectés. L'ordre de parcours des points doit être respecté (les points 4 et 10 ont obtenu une nouvelle position).

Indice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Numéro de point	1	4	3	5	7	10	9	11	12	13	14	15	16	18	20	21	22	24

TAB. B.3 – Liste N18 contenant l'ordre de parcours des points.



# Annexe C

## Modèles 3D utilisés

Les modèles 3D utilisés dans cette thèse proviennent de différentes sources. Nous remercions les créateurs de ces modèles ainsi que AIM@SHAPE pour les avoir mis à disposition. Les modèles 3D ainsi que le nom de leur créateur (s'ils sont disponibles) apparaissent ci-dessous.

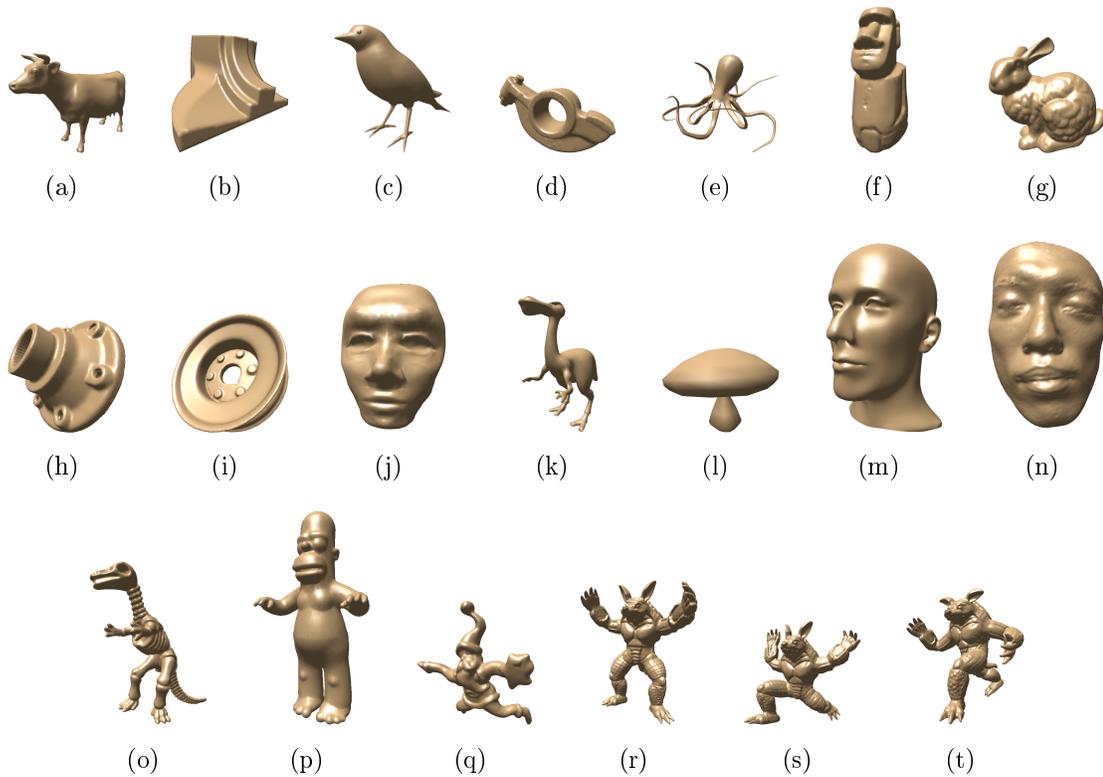


FIG. C.1 – Modèles 3D utilisés dans cette thèse.

Figure	Modèle	Figure	Modèle
(a)	Cow	(b)	Fandisk
(c)	Bird	(d)	Rocker arm
(e)	Octopus	(f)	Moai (MPII)
(g)	Stanford Bunny (Stanford University)	(h)	Carter (INRIA and ISTI)
(i)	Pulley (INRIA and ISTI)	(j)	A head (3D CAFE)
(k)	Dinopet(3D CAFE)	(l)	Mushroom (3D CAFE)
(m)	Mannequin	(n)	Face-YO
(o)	Dinosaur (Cyberware)	(p)	Homer
(q)	Santa (Cyberware)	(r)	Armadillo 0 (ID :773) (Stanford University) modifié par Shin Yoshizawa
(s)	Armadillo 1 (ID :657) (Stanford University) modifié par Shin Yoshizawa	(t)	Armadillo 8 (ID :664) (Stanford University) modifié Shin Yoshizawa

TAB. C.1 – Nom des modèles 3D et leur créateur (s'ils sont disponibles)

# Index

- Arête, 8
  - voisinage, 13
- Arc, 8
- Atlas de texture, 21
- Bande étroite, 124
- Caractéristique d’Euler-Poincaré, 11
- Cluster, 16
- Complexe de Morse, 55
- Complexité, 19
- Compression de maillage, 20
- Contour actif, 52
- Coupe minimale, 47
- Courbure, 113
  - absolue, 32, 115
  - directionnelle, 121
  - gaussienne, 114
  - moyenne, 114
  - norme de la matrice de covariance, 118
  - principale, 114
  - RMS, 115
  - tenseur de courbure, 120
  - théorème d’Euler, 114
- Critère de Delaunay, 10
- Croissance de régions, 24
  - germe, 24
- Décomposition convexe, 61
- Détection de collisions, 22
- Diagramme de Voronoï, 10
- Dynamique de bassin, 98
- Face, 7
  - degré, 8
  - voisinage, 13
- Geons, 62
- Graph cut, 47
- Graphe dual, 62
- Indexation, 57
- Interfaces de dessin, 23
- Ligne de partage des eaux, 30, 62, 79
  - Bassin versant, 79
  - LPE, 30, 79
  - Marqueurs, 31
  - Minima, 30
- Lignes de crêtes, 122
- Loi des minima, 58, 105
- Métamorphose, 22
- Maillage polygonal, 7
  - 2-manifold, 10
  - conforme, 9
  - dual, 12, 14
  - irrégulier, 8
  - multi-résolutions, 8
  - non-manifold, 11
  - orientable, 11
  - primal, 12
  - régulier, 8
  - semi-régulier, 8
  - simplexe, 7
- Manifold, 10
- Mappage de texture, 21
- Mean shift, 54
- Modélisation tridimensionnelle, 6

- filaire, 6
- surfacique, 6
- volumique, 6
- Narrowband, 124
- Nœud, 7
- Papercraft, 21
- Paramétrisation, 21
- Paramètre de contrôle, 19
- Partition de graphe, 13
- Patches surfaciques, 5
- Plaquage de texture, 21
- Plateau minimum, 89
- Point  $P$ -simple, 70
- Point simple, 70, 144, 217
- Profondeur de la LPE, 32, 103
- Protrusion, 60, 64
- Rétro-ingénierie, 22
- Radiosité, 23
- Reconnaissance de forme, 23, 57
- Remaillage, 20
- Reverse engineering, 22
- Saillance, 60
- Segmentation, 13
  - carreau surfacique, 18, 19
  - contrainte, 14
  - critère, 14
  - hiérarchique / multi-échelle, 19
  - partie significative, 18
- Sensibilité à la pose, 19
- Simplification, 20
- SKIZ, 82
- Sommet, 7
  - 1-voisinage, 13
  - degré, 13
  - indépendant, 13
  - indépendant maximal, 13
  - valence, 8
- Tatouage numérique, 23
- Théorie de Morse, 55
- Variétés, 10
- Vertex, 7
- Vertice, 7
- Zones d'influences géodésiques, 82

# Index des auteurs cités

- Abidi, Mongi A. 26, 29, 33, 36, 53, 62, 63, 103, 105, 121, 123
- Agathos, Alexander 2, 14, 57
- Agus, Marco 23
- Ahn, Minsu 45, 49
- Ahuja, Narendra 23
- Alexa, Marc 22, 23
- Alliez, Pierre 7, 20, 28, 40, 44, 45, 47, 48, 121, 151
- Alpert, Charles J. 50
- Amato, Nancy M. 57, 62–64, 70
- Antini, Gianni 73, 74
- Atkar, Prasad N. 34, 36
- Attene, Marco 2, 15, 16, 18, 20, 23, 39, 41, 57, 69, 73, 76, 134, 155, 164, 171–175, 178
- Aujay, Grégoire 57, 73
- Azariadis, Philip 2, 14, 57
- Bac, Alexandra 122
- Bacus, James W. 17
- Baddeley, Adrian J. 17
- Bae, MyungSoo 33, 36
- Bai, Zhaojun 67, 68
- Ballard, Dana Harry 6
- Balogh, Emese 144–146, 148
- Barr, Alan H. 26, 40, 116
- Baskurt, Atilla 13, 20, 23, 27, 29, 30, 57, 75, 76, 121, 127, 157
- Beare, Richard 89
- Belongie, Serge 51
- Belyaev, Alexander G. 45, 49, 54, 123, 139, 156, 174
- Benkő, Pál 23
- Bercovier, Michel 21
- Bergou, Miklós 47, 48

- Bernard, Thierry M. 148
- Berretti, Stefano 73, 74
- Bertrand, Gilles 102, 148
- Betsler, Jonathan 34, 35, 133
- Beucher, Serge 2, 13, 34, 79, 84, 88, 90, 91, 93–96, 98, 108, 112, 133
- Biasotti, Silvia 57, 69, 70, 73
- Bicego, Manuele 113
- Biederman, Irving 62
- Bimbo, Alberto Del 73, 74
- Bischoff, Stephan 53, 151
- Blacker, Ted 21
- Blum, Frédéric 57
- Boier-Martin, Ioana M. 54, 56
- Boné, Romuald 34–36, 70, 72, 119, 133, 139, 146, 171
- Botsch, Mario 151
- Bouakaz, Saïda 13
- Bradley, Colin 52
- Brown, Christopher M. 6
- Brun, Luc 102
- Brunner, David 70, 72, 151, 180, 181
- Brunnett, Guido 70, 72, 151, 180, 181
- Bull, David R. 91
- Canagaraajah, Cedric Nishan 91
- Cardoso, Jaime S. 17
- Cardot, Hubert 35, 36, 70, 72, 113, 119, 133, 139, 146, 171
- Carr, Nathan A. 22, 27, 29
- Cates, Joshua E. 103
- Cayre, François 24
- Cazals, Frédéric 123
- Chabrier, Sébastien 17
- Chaillou, Christophe 22
- Chaine, Raphaëlle 13
- Chazelle, Bernard 25, 29, 61, 63
- Chen, Lijun 34, 36
- Chen, Tai-Guang 75, 76
- Chen, Zhonggui 23, 53, 54, 129, 152, 180
- Cheung, Peter Y. K. 13
- Chevalier, Laurent 13, 75, 76
- Choe, Sungyul 45, 49
- Choset, Howie 34, 36
- Chung, Fan Rong K. 51

- Clark, Doug E. R. 74, 76
- Clements, Andrew 164, 166, 180
- Clements, Jan 21
- Cohen, Laurent 44, 48
- Cohen-Or, Daniel 15, 16, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 53, 54, 62, 64, 74, 76
- Cohen-Steiner, David 20, 28, 40, 44, 45, 47, 48, 120, 121
- Colin de Verdière, Éric 56
- Comaniciu, Dorin 13, 54
- Conner, David C. 34, 36
- Corney, Jonathan R. 74, 76
- Corte-Real, Luís 17
- Coupric, Michel 102
- Cowsar, Lawrence 8
- Cox, Jordan 22
- Crane, Keenan 22, 27, 29
- Cristani, Marco 113
- Cubero-Castan, Eliane 99, 101, 214
- Culver, Tim 69
- Cutzu, Florin 75, 76
- da Silva, Eduardo Antonio Barros 91
- da Silva, Wellington D. Felix 102
- Dachsbacher, Carsten 22
- Daniel, Marc 122
- Daoudi, Mohamed 57, 73, 74
- Daras, Petros 71, 72
- Darbon, Jérôme 113
- Date, Hiroaki 28, 29
- De Amicis, Raffaele 73, 74
- De Winter, Joeri 60
- Del Bimbo, Alberto 73, 74
- Delest, Sébastien 34–36, 70, 72, 119, 133, 139, 146, 171
- Delingette, Hervé 7
- Dequidt, Jérémie 22
- DeRose, Tony 25, 30
- Desbrun, Mathieu 20, 28, 40, 44, 45, 47, 48, 116, 121
- Devillers, Olivier 7, 121
- Dey, Tamal K. 66, 67
- Dickinson, Sven J. 69
- Digabel, Hervé 84
- Dobkin, David P. 8, 25, 29, 55, 56, 61, 63

- Duchamp, Tom 25, 30
- Dugelay, Jean-Luc 57
- Dupont, Florent 20, 23, 27, 29, 30, 57, 121, 127, 157
- Dutartre, Arnaud 57
- Eck, Matthias 25, 30
- Erdöhelyi, Balázs 144–146, 148
- Erickson, Jeff 56
- Facello, Michael A. 55, 56
- Falcidieno, Bianca 15, 23, 39, 41, 57, 61, 63, 68, 69, 164, 171–174
- Farin, Gerald 32, 34, 36, 119, 121
- Filali Ansary, Tarik 57
- Fjørtoft, Roger 99, 101, 214
- Floater, Michael S. 21
- Fowlkes, Charless C. 18, 51, 112
- Fratani, Frédéric 57
- Friedrich, Heiko 16, 75, 76
- Fritts, Jason E. 18
- Funkhouser, Thomas 15, 18, 55, 56
- Furuhata, Tomotake 38, 41
- Fusiello, Andrea 113
- Garcia, Emmanuel 57
- Garland, Michael 20, 22, 23, 37, 39–41, 55, 73
- Gatica-Perez, Daniel 91, 103
- Gee, Linda A. 103
- Gelfand, Natasha 15, 39, 41
- Georganas, Nicolas D. 34, 36
- Géraud, Thierry 113
- Giesen, Joachim 66, 67
- Gobbetti, Enrico 23
- Goldenthal, Rony 16, 21, 25, 27, 29, 54
- Goldman, Sally A. 18
- Golovinskiy, Aleksey 15
- Gorsich, David 26, 29, 62, 63
- Gortler, Steven J. 21, 27, 38, 41, 43, 48, 54, 55
- Goswami, Samrat 66, 67
- Gotsman, Craig 13, 14, 20, 50–52, 57, 71, 72
- Gottschalk, Stefan 22
- Grau, Vicente 103
- Greenfield, Aaron 34, 36
- Gregory, Arthur 22, 55
- Grimaud, Michel 98, 99, 101

- Grinspun, Eitan 47, 48
- Grisoni, Laurent 22
- Gu, Chuang 91, 103
- Gu, Xianfeng 21, 54
- Guibas, Leonidas J. 15, 39, 41
- Guigues, Laurent 17
- Gumhold, Stefan 45, 49
- Günther, Johannes 16, 75, 76
- Guo, Baining 21, 51, 52, 63
- Haider, Christoph 53
- Halmi, Csongor 144–146, 148
- Hamann, Bernd 67, 68
- Han, Xiao 33, 35, 36, 127
- Hanbury, Allan 53, 98, 112
- Har-Peled, Sariel 56
- Haralick, Robert 13
- Harpaz, Rave 13
- Hart, John C. 22, 27, 29, 73
- Hausegger, Klaus 144–146, 148
- Heckbert, Paul S. 20, 22, 23, 37, 39–41, 55
- Hege, Hans-Christian 22, 55
- Hetroy, Franck 57, 73, 75, 76
- Hettiaratchi, Sambuddhi 13
- Hideo, Yokota 123
- Hilaga, Masaki 65, 66, 73, 124, 179
- Hildebrandt, Klaus 123
- Hill, Paul R. 91
- Hoberock, Jared 22, 27, 29
- Hofer, Michael 53
- Hoffman, Donald D. 58, 60, 67
- Hong, Byung-Woo 46
- Hoppe, Hugues 8, 21, 25, 27, 30, 38, 41, 43, 48, 54, 55
- Hormann, Kai 21
- Hu, Shi-Min 15, 46, 49, 127
- Huang, Zhiyong 22, 64, 65, 67, 70, 178
- Huet, Florence 18
- Igarashi, Takeo 23
- Ikonen, Leena 127
- Inoue, Keisuke 38, 41
- Isenburg, Martin 7
- Itoh, Takayuki 38, 41
- Jaillet, Fabrice 13, 75, 76

- Jain, Varun 51, 52, 62, 63
- Jaklič, Aleš 13, 75, 76
- James, Doug L. 75, 76
- Ji, Zhongping 23, 53, 54, 129, 152, 180
- Jiménez, Pablo 22
- Jones, Greg M. 103
- Julius, Dan 21, 28, 46, 49, 63, 64
- Jung, Moonryul 27, 29, 52, 54
- Kakadiaris, Ioannis A. 141, 143, 180
- Kalogerakis, Evangelos 75, 76
- Kalvin, Alan D. 20, 25, 29
- Kanai, Satoshi 28, 29
- Karabassi, Evaggelia-Aggeliki xv, 25, 29, 140, 141, 143
- Karni, Zachy 20, 50, 52
- Karypis, George 13, 50
- Katz, Sagi 2, 16, 18, 22, 27, 42, 43, 48, 57, 62, 63, 66, 68, 70, 76, 134, 155, 171–175, 178
- Kazhdan, Michael 18, 55, 56
- Keyser, John 57, 63, 69
- Kiefer, William 55, 56
- Kikinis, Ron 103
- Kim, Haengkang 52, 54
- Kima, Dong Hwa 39, 41
- Kimia, Benjamin B. 69
- Kimmel, Ron 33, 34, 105, 124, 174
- Kishinami, Takeshi 28, 29
- Klein, Philip N. 69
- Klein, Reinhard 16, 75, 76
- Kobbelt, Leif P. 44, 45, 47, 48, 53, 71, 72, 151
- Kohmura, Taku 65, 66, 73, 124, 179
- Kompatsiaris, Ioannis 66, 68
- Korošec, Peter 13, 56
- Koschan, Andreas 26, 29, 33, 36, 53, 62, 63, 105, 121, 123
- Kraevoy, Vladislav 21, 28, 46, 49, 63, 64
- Kuba, Attila 144–146, 148
- Kumar, Vipin 13, 50
- Kunii, Toshiyasu L. 65, 66, 73, 124, 179
- Kwon, Ki-Ryong 24
- Lai, Yu-Kun 15, 46, 49, 127
- Laishui, Zhou 55, 56
- Langbein, Frank C. 53, 54
- Lantuéjoul, Christian 84

- Lavoué, Guillaume 20, 23, 27, 29, 57, 121, 127, 157
- Lazarus, Francis 22, 56, 57, 73
- Lee, Aaron W. F. 8
- Lee, Sang Uk 39, 41
- Lee, Seungyong 19, 23, 45, 49, 53, 54, 62, 64
- Lee, Suk-Hwan 24
- Lee, Tong-Yee 16, 75, 76
- Lee, Yunjin 19, 23, 45, 49, 53, 54, 62, 64
- Lefebvre, Sylvain 22
- Leifman, George 66, 68, 171–174
- Lemaréchal, Cédric 99, 101, 214
- Leonardis, Aleš 13, 75, 76
- Levine, Martin D. 53, 61, 63
- Lévy, Bruno 21, 25–27, 30, 121, 123, 151
- Lewiner, Thomas 71, 72
- Lezoray, Olivier 113
- Li, Xuetao 22, 65, 67, 70
- Li, Yin 23, 53
- Liao, Hong-Yuan Mark 67, 68
- Lichau, Daniel 57
- Lien, Jyh-Ming 57, 62–64, 70
- Lin, Chun-Hao 16, 75, 76
- Lin, Hsueh-Yi Sean 67, 68
- Lin, Ja-Chen 67, 68
- Lin, Ming C. 22, 55
- Lin, Ping-Hsien 16, 75, 76
- Lischinski, Dani 16, 21, 25, 27, 29
- Liu, Ligang 23, 53, 54, 129, 152, 180
- Liu, Rong 51, 52, 62–64
- Liu, Shenglan 53, 54
- Liu, Yang 47, 49
- Liu, Zhen 20
- Livingston, Mark A. 22, 55
- Liyan, Zhang 55, 56
- Lloyd, Stuart P. 42
- Lohou, Christophe 70, 148
- Longuet, Bernard 148
- Lotufo, Roberto de Alencar 102
- Lounsbery, Michael 25, 30
- Ma, Lizhuang 152, 180
- Macq, Benoît 24
- Mademlis, Athanassios 71, 72

- Maillot, Jérôme 21, 25–27, 30, 123
- Malik, Jitendra 18, 51, 98, 112
- Mallet, Jean-Laurent 21
- Maltret, Jean-Louis 122
- Mamou, Khaled 18, 40, 41
- Manay, Siddharth 46
- Mangan, Alan P. 2, 31, 36, 103, 104, 118, 130, 131, 207
- Manocha, Dinesh 22, 55, 69
- Manzanera, Antoine 148
- Marcotegui, Beatriz 13, 96, 98, 112, 133
- Marin, Philippe 23, 26, 29
- Marini, Simone 57, 70
- Marinov, Martin 45, 48
- Marthon, Philippe 99, 101, 214
- Martin, David R. 17, 18, 112
- Martin, Ralph R. 22, 46, 49, 53, 54
- Mathur, Saurabh 47, 48
- Meer, Peter 13, 54
- Meijster, Arnold 33, 84, 85, 89, 103
- Mendoça, Gelson Vieira 91
- Meseure, Philippe 22
- Mewes, Andrea U. J. 103
- Meyer, André 23, 26, 29
- Meyer, Fernand 88, 102
- Meyer, Mark 40, 116
- Milroy, Michael J. 52
- Min, Kyungha 27, 29
- Min, Patrick 18, 55, 56
- Mischaikow, Konstantin 27, 30
- Mitani, Jun 26, 30
- Mizoguchi, Tomohiro 28, 29
- Mokhtari, Myriam 102
- Moron, Véronique 6
- Mortara, Michela 2, 16, 18, 57, 68–70, 76, 134, 155, 171–175, 178
- Morvan, Jean-Marie 120
- Mui, Jack K. 17
- Mukaiyama, Akio 24
- Murino, Vittorio 113
- Najman, Laurent 99, 102
- Natarajan, Vijay 67, 68
- Nealen, Andrew 23
- Neves, Sérgio Rodrigues 91

- Nguyen, Hieu Tat 89, 180
- Ni, Xinlai 73
- Nielsen, Frank 23
- Nock, Richard 23
- Ohbuchi, Ryutarou 24
- Ohtake, Yutaka 45, 49, 54, 123
- Page, David Lon 33, 36, 53, 60, 62, 105, 121, 123
- Pageot, Grégory 35, 70, 72, 139, 146
- Paik, Joon Ki 26, 29, 33, 36, 62, 63
- Pala, Pietro 73, 74
- Palágyi, Kálmán 144–146, 148
- Papaioannou, Georgios xv, 25, 29, 140, 141, 143
- Passalis, Georgios 141, 143, 180
- Patané, Giuseppe 2, 16, 18, 57, 68–70, 76, 134, 155, 171–175, 178
- Pauly, Mark 151
- Peng, Hao-yu 20
- Perantonis, Stavros 2, 14, 57
- Petitjean, Sylvain 21, 25–27, 30, 123
- Peyré, Gabriel 44, 48
- Philipp-Foliguet, Sylvie 17, 18
- Podolak, Joshua 15
- Polthier, Konrad 123
- Pottmann, Helmut 15, 46, 53, 127
- Pouget, Marc 123
- Pratikakis, Ioannis 2, 14, 57
- Praun, Emil 21
- Preda, Marius 18
- Prêteux, Françoise J. 18, 40, 41, 57, 81, 148
- Prince, Jerry L. 33, 35, 36, 127
- Pulla, Sandeep 32, 34, 36, 119, 121
- Qin, Ai-hong 20
- Raab, Roni 57, 71, 72
- Ray, Nicolas 21, 25–27, 30, 123
- Raya, Mariano Alcañiz 103
- Razdan, Anshuman 32–34, 36, 119, 121
- Rea, Heather J. 74, 76
- Reniers, Dennie 71
- Reniers, Jarke, Dennieand van Wijk 71
- Rettmann, Maryam E. 33, 35, 36, 127
- Ricard, Julien 57
- Richards, Whitman A. 58

- Rizzi, Alfred A. 34, 36
- Robbiano, Francesco 69
- Roberts, Stephen J. 13
- Robič, Borut 13, 56
- Roerdink, Jos B.T.M. 33, 84, 85, 89, 103
- Rondão Alface, Patrice 23, 24
- Rose, Kenneth 21
- Rosin, Paul L. 53, 54
- Rossignac, Jarek 68, 69, 171–174
- Rössl, Christian 151
- Roudet, Celine 27, 30, 127
- Rusinkiewicz, Szymon 15, 55, 56
- Sander, Pedro V. 21, 27, 38, 41, 43, 48, 55
- Sapidis, Nikolaos 2, 14, 57
- Sarlette, Ralf 16, 75, 76
- Sattler, Mirko 16, 75, 76
- Savage, Bertrand 57
- Schmitt, Michel 99
- Schröder, Peter 40, 116
- Sebastian, Thomas B. 69
- Seidel, Hans-Peter 16, 19, 23, 45, 49, 53, 54, 62, 64, 75, 76, 123, 139, 156, 174
- Serra, Jean 83
- Sethian, James A. 33, 34, 105, 124, 174
- Seyranian, Gregory D. 60
- Shamir, Ariel 2, 5, 14–16, 19, 23, 53, 54, 57, 62, 64, 71, 72, 74, 76, 177
- Shapira, Lior 15, 54, 74, 76
- Sharf, Andrei 71, 72
- Sheffer, Alla 21, 28, 38, 41, 46, 49, 57, 63, 64, 71, 72
- Shenglan, Liu 55, 56
- Shi, Jianbo 17, 98
- Shi, Jiao-ying 20
- Shilane, Philip 15, 18, 55, 56
- Shimada, Kenji 23, 28, 29, 38, 41
- Shinagawa, Yoshihisa 65, 66, 73, 124, 179
- Shlafman, Shymon 20, 22, 23, 27, 33, 36, 42, 48, 57, 62, 63, 78, 119
- Shokoufandeh, Ali 69
- Shouraboura, Nadia 25, 29, 61, 63
- Shum, Heung-Yeung 21, 23, 51–53, 63
- Siddiqi, Kaleem 69
- Šilc, Jurij 13, 56
- Simari, Patricio D. 45, 49, 75, 76

- Singh, Karan 45, 49, 75, 76
- Singh, Manish 60, 67
- Slusallek, Philipp 16, 75, 76
- Snyder, John 21, 27, 38, 41, 43, 48, 55
- Soatto, Stefano 46
- Soille, Pierre 84, 85
- Solina, Franc 13, 75, 76
- Sorantin, Erich 144–146, 148
- Sorkine, Olga 16, 21, 23, 25, 27, 29
- Spagnuolo, Michela 2, 15, 16, 18, 23, 39, 41, 57, 61, 63, 68, 69, 73, 76, 134, 155, 164, 171–175, 178
- Spanò, Leonardo 23
- Stalling, Detlev 22, 55
- State, Andrei 22, 55
- Steiner, Tibor 53
- Strintzis, Michael 71, 72
- Strintzis, Michael G. 66, 68
- Strub, Pierre-Yves 113
- Stuetzle, Werner 25, 30
- Sun, Jian 23, 53
- Sun, Ming-Ting 91, 103
- Sun, Yiyong 33, 36
- Suzuki, Hiromasa 26, 30
- Sweldens, Wim 8
- Symonova, Olga 73, 74
- Synder, John 21, 51, 52, 63
- Takahashi, Shigeo 24
- Tal, Ayellet 2, 16, 18, 20, 22, 23, 25, 27, 29, 33, 36, 42, 43, 48, 55–57, 61–63, 66, 68, 70, 76, 78, 119, 134, 155, 171–175, 178
- Tal, Doron 18
- Tan, Kar-Han 23
- Tang, Chi-Keung 23, 53
- Tangelder, Johan W. H. 57
- Taubin, Gabriel 120
- Taylor, Nick K. 74, 76
- Taylor, Russell H. 20, 25, 29
- Telea, Alexandru 71
- Terék, Zsolt 55, 56
- Theoharis, Theoharis xv, 25, 29, 140, 141, 143, 180
- Thirion, Jean-Philippe 123
- Thomas, Federico 22
- Tierny, Julien 73, 74

- Toon, Tong Wing 22, 65, 67, 70
- Torras, Carmen 22
- Tung, Tony 57
- Turk, Greg 27, 30
- Twigg, Christopher D. 75, 76
- Tzovaras, Dimitrios 71, 72
- Ucelli, Giuliana 20
- Valette, Sébastien 7, 66, 68
- van den Boomgaard, Rein 89, 180
- Vandeborre, Jean-Philippe 57, 73, 74
- Várady, Tamás 22, 23, 55, 56
- Veltkamp, Remco C. 57
- Verroust, Anne 22, 73
- Vickers, Geoffrey W. 52
- Vieira, Miguel 23, 28, 29
- Vincent, Luc 84, 85, 93
- Vinet, Laurent 17
- Wagemans, Johan 60
- Wald, Ingo 16, 75, 76
- Wallner, Johannes 15, 46, 127
- Wang, Guojin 23, 53, 54, 129, 152, 180
- Wang, Wenping 47, 49
- Wang, Yu-Shuen 75, 76
- Wardetzky, Max 47, 48, 123
- Warfield, Simon K. 103
- Werghi, Naoufel 73, 74
- Whitaker, Ross T. 2, 31, 36, 103, 104, 118, 130, 131, 207
- Willmott, Andrew 20, 22, 23, 37, 39–41
- Wood, Zoë J. 21, 27, 43, 48, 55
- Worring, Marcel 89, 180
- Wu, Jianhua 44, 47, 48
- Wu, Kenong 53, 61, 63
- Xi, Wu 55, 56
- Xiong, Hua 20
- Xu, Chenyang 33, 35, 36, 127
- Yamada, Atsushi 38, 41
- Yamauchi, Hitoshi 45, 49, 54
- Yamazaki, Ichitaro 67, 68
- Yan, Dong-Ming 47, 49
- Yan, Shaur-Uei 16, 75, 76
- Yao, So-Zen 50
- Yasnoff, William A. 17

- Yezzi, Anthony J. 46
- Yong, Zhou 152, 180
- Yoshizawa, Shin 123, 139, 156, 174
- Yu, Stella X. 17
- Yun, Il Dong 39, 41
- Zaharia, Titus B. 18, 40, 41, 57
- Zayer, Rhaleb 45, 49
- Zhang, Eugene 27, 30
- Zhang, Hao 51, 52, 62–64, 164, 166, 180
- Zhang, Hui 18
- Zhang, Yan 26, 29, 62, 63
- Zhao, Mingxi 152, 180
- Zhou, Kun 21, 51, 52, 63
- Zhou, Qian-Yi 15, 46, 49, 127
- Zhou, Yinan 64, 67, 178
- Zöckler, Malte 22, 55
- Zucker, Steven W. 69
- Zuckerberger, Emanuel 20, 22, 23, 33, 36, 57, 62, 63, 78, 119









# Résumé

La segmentation de maillages polygonaux est un outil nécessaire à de nombreuses applications. Elle correspond au découpage du maillage en régions à partir d'informations portant sur la surface ou la forme globale de l'objet. Ces dernières années, de nombreux algorithmes ont été proposés dans cette thématique en large expansion. Les applications sont très variées ; citons la reconnaissance de forme, l'indexation, la compression, la métamorphose, la détection de collision, le plaquage de texture, la simplification, etc.

Nous proposons dans un premier temps une étude assez large des méthodes de segmentation de maillages polygonaux. Nous abordons les algorithmes pour les deux principales familles de méthodes que sont la segmentation en carreaux surfaciques et la segmentation en parties significatives. Nous avons concentré nos travaux sur la ligne de partage des eaux (LPE) et formulé des propositions originales pour la fonction de hauteur de la LPE et des stratégies pour limiter la sur-segmentation que produit naturellement la LPE.

**Mots clés** : Maillage, Segmentation, LPE, Marqueurs, Carreaux surfaciques, Parties significatives

# Abstract

Mesh segmentation is a necessary tool for many applications. The mesh is decomposed into several regions from surface or shape information. In the last several years, many algorithms have been proposed in this growing area, with applications in many different areas as 3D shape matching and retrieval, compression, metamorphosis, collision detection, texture mapping, simplification, etc.

First, we propose a review of mesh segmentation methods. We discuss about the algorithms relative to the two main types of methods : the patch-type segmentation and the part-type segmentation. We focused on the watershed transformation and proposed new approaches relating to the height function and strategies to avoid over segmentation produced by the watershed.

**Keywords** : Mesh, Segmentation, Watershed, Markers, Patch-type segmentation, Part-type segmentation