



**HAL**  
open science

# Compression adaptative de surfaces par ondelettes géométriques.

Céline Roudet

► **To cite this version:**

Céline Roudet. Compression adaptative de surfaces par ondelettes géométriques.. Autre [cs.OH].  
Université Claude Bernard - Lyon I, 2008. Français. NNT : 2008LYO10221 . tel-00589400

**HAL Id: tel-00589400**

**<https://theses.hal.science/tel-00589400v1>**

Submitted on 28 Apr 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 221-2008

Année 2008

**UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD - LYON 1**

UFR INFORMATIQUE

École doctorale « Informatique et Information pour la société » (EDIIS) de Lyon

**THÈSE DE L'UNIVERSITÉ DE LYON**

pour l'obtention

**du DIPLÔME DE DOCTORAT**

(arrêté du 7 août 2006)

présentée par

**Céline ROUDET**

---

**COMPRESSION ADAPTATIVE DE SURFACES PAR  
ONDELETTES GÉOMÉTRIQUES.**

---

Thèse dirigée par Florent DUPONT et Atila BASKURT

soutenue publiquement le 24/11/2008 devant le jury composé de :

Marc ANTONINI	Directeur de Recherche CNRS, Sophia Antipolis	Rapporteur
Frédéric TRUCHETET	Professeur à l'Université de Bourgogne, Le Creusot	Rapporteur
Atila BASKURT	Professeur à l'INSA de Lyon	Directeur
Florent DUPONT	Maître de Conférence à l'UCB Lyon 1	Co-encadrant
Marc DANIEL	Professeur à l'Université de la Méditerranée, Marseille	Examineur
Patrick GIOIA	Ingénieur de Recherche chez Orange Labs	Examineur



"S'il n'y a pas de solution, c'est  
qu'il n'y a pas de problème".

*Jacques Rouxel - Extrait de la BD "Les  
Shadoks".*





---

## Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche entre le Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information (LIRIS) de Lyon, Unité Mixte de Recherche (UMR 5205 CNRS) et le laboratoire TECH/IRIS de Orange Labs à Rennes. Je remercie tout d'abord chaleureusement Monsieur le Professeur Bernard Péroche, directeur du LIRIS pour m'avoir accueillie au sein du labo depuis mon stage de Master 2 Recherche. Mes remerciements s'adressent ensuite à Monsieur Patrick Gioia, ingénieur de recherche chez Orange Labs et correspondant principal dans le cadre de ce projet. Un grand merci pour ses remarques constructives par téléphone ou par mail, de la confiance qu'il m'a accordée pour mener à bien cette thèse, de m'avoir accueillie plusieurs fois chez Orange Labs à Rennes et enfin d'avoir accepté de participer au jury de soutenance.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur le Professeur Atilla Baskurt et Monsieur Florent Dupont qui ont assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de thèse, durant ces trois années. Leurs encouragements, leur soutien, le suivi régulier et la confiance qu'ils ont su m'accorder m'ont permis d'accomplir les objectifs principaux de cette thèse. Je les remercie également de m'avoir fait bénéficier de leur expérience et de leurs compétences.

Je voudrais ensuite remercier Monsieur Marc Antonini, Directeur de recherche CNRS à Sophia Antipolis et Monsieur Frédéric Truchetet, Professeur à l'Université de Bourgogne au Creusot, pour avoir accepté de juger ces travaux en tant que rapporteurs. Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Marc Daniel, Professeur à l'ESIL de Marseille pour avoir accepté de participer au jury de soutenance.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont pu participer, tant d'un point de vue scientifique qu'humain, à ce travail. Pour commencer, un grand merci à Frédéric Payan pour avoir pris le temps de répondre à mes mails qui contenaient parfois beaucoup de questions! Merci à lui et à Andrei Khodakovsky pour m'avoir fourni les modèles 3D qui m'ont servi tout au long de la thèse, ainsi qu'à Sébastien Valette, Guillaume Lavoué, Basile Sauvage, Jeong-Hyu Yang et Igor Guskov pour leur aide précieuse.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du laboratoire LIRIS pour leurs conseils avisés et aides multiples. Merci à tous les occupants du bâtiment Nautibus pour leur sympathie durant ces trois années de thèse et la bonne ambiance qui y régnait. Merci à Brigitte, Sylvie et Eric pour leur aide "administrative" ou "technique" et leur bonne humeur. Plus particulièrement, un grand merci à Raphaëlle, Hector, Denis, Serge, Lionel, Christine, Jean-Philippe et Christian pour avoir su me faire bénéficier de leur expérience,

pour leur soutien et pour les bons moments passés au labo et aussi en dehors.

Merci beaucoup à Brice, Guillaume J. et Antoine avec qui nous avons fait un bout de chemin ensemble, depuis le Master et qui ont toujours su m'encourager et m'épauler, sans qui ces trois années auraient sûrement été beaucoup moins agréables. Merci aussi à Cagatay, Guillaume L., Samira, Adrian, Bernardo, Lotfi et Bertrand pour m'avoir supportée en tant que "co-bureau". Je n'oublie bien sûr pas tous les doctorants de la TD7 (initialement occupants de la TD8 pour certains), et plus particulièrement Anne-Laure, Anthony, Olivier, Romain, mais aussi les autres thésards ou personnels du labo dont Nicolas Z., Julien R., Romain V., Julien S., Sébastien S., Carole, Rosanna, Amélie, Magali, Marianne, Damien, Gabriel, Ovidiu, Loris, Vincent ... pour les bons moments partagés au labo et/ou à l'extérieur.

Bien évidemment je ne pourrai terminer sans remercier chaleureusement mes amis, ma famille et plus particulièrement mes parents qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu jusqu'au bout, même en étant à plusieurs centaines de kilomètres de moi. Merci aussi à Thomas sans qui je ne me serai probablement pas lancée dans cette aventure et pour son soutien ... merci enfin à Séb pour avoir su s'intéresser de près à mes travaux, pour ses encouragements et son aide précieuse lors de ses relectures et corrections, notamment de ce mémoire.

---

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Abbréviations</b>	<b>xvii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>3</b>
<b>1 Cadre de l'étude : la modélisation et la compression 3D</b>	<b>9</b>
1.1 Domaines d'utilisation des objets 3D	10
1.2 Création et modélisation des objets 3D	10
1.3 Les diverses formes de codage des maillages	12
1.3.1 Codage naïf	12
1.3.2 La compression de maillages sans perte	13
1.3.3 La compression avec pertes par transformation	15
1.4 Principes de l'analyse multirésolution	17
1.4.1 Théorie de la transformée en ondelettes	17
1.4.2 Théorie de l'analyse multirésolution dyadique	20
1.5 L'analyse multirésolution pour les maillages surfaciques	21
1.5.1 Généralités sur les surfaces de subdivision	22
1.5.2 Les ondelettes de seconde génération	26
1.6 Principe de la décorrélation hiérarchique et contextuelle	28
1.6.1 Décorrélation appliquée aux images	28
1.6.2 Principe de l'extension aux maillages	30
1.7 Le codage entropique	31
1.7.1 Le codage de Huffman	31
1.7.2 Le codage arithmétique	31
1.7.3 Les codeurs adaptatifs	31
<b>2 Etat de l'art en analyse multirésolution de maillages surfaciques</b>	<b>33</b>
2.1 Terminologie utilisée dans la suite de ce document	34
2.2 Analyse multirésolution sur des maillages irréguliers	35
2.2.1 Méthodes pionnières	36
2.2.2 Méthodes plus récentes	37
2.3 Généralités sur la paramétrisation et le remaillage	38
2.4 Remaillage régulier sous forme d'image géométrique	40
2.5 Remaillage semi-régulier construit par raffinement	43
2.5.1 Technique pionnière	43
2.5.2 Techniques basées sur un partitionnement de l'objet initial	43
2.6 Remaillage semi-régulier construit par décimation	47
2.6.1 Méthode pionnière : MAPS	47

2.6.2	Méthodes basées sur une représentation scalaire des détails . . . . .	47
2.7	Méthodes récentes de paramétrisation "globally smooth" . . . . .	49
2.8	Analyse multirésolution et compression de ces structures semi-régulières . . . . .	51
2.8.1	Méthode pionnière : <i>PGC</i> . . . . .	51
2.8.2	Analyse par subdivision interpolante . . . . .	52
2.8.3	Méthodes récentes basées sur la transformée de Loop . . . . .	54
<b>3</b>	<b>Etude des coefficients d'ondelettes obtenus par prédiction interpolante</b> . . . . .	<b>59</b>
3.1	Introduction . . . . .	59
3.2	Les différents types de remaillages considérés . . . . .	60
3.3	Les différentes décompositions possibles . . . . .	65
3.3.1	Schémas de prédiction considérés . . . . .	65
3.3.2	Transformées en ondelettes utilisées . . . . .	68
3.3.3	Résultats expérimentaux . . . . .	70
3.4	Expression de la rugosité par les coefficients d'ondelettes . . . . .	76
3.4.1	Mesures considérées : amplitude et angle polaire des coefficients . . . . .	77
3.4.2	Restriction des intervalles considérés . . . . .	79
3.4.3	agrégation de toutes les ondelettes de la hiérarchie . . . . .	79
3.5	Comparaisons expérimentales . . . . .	82
3.5.1	Comparaison de la répartition des coefficients . . . . .	82
3.5.2	Comparaisons des résultats avec d'autres mesures de rugosité . . . . .	85
3.6	Conclusion . . . . .	89
<b>4</b>	<b>Segmentation de maillages basée ondelettes</b> . . . . .	<b>91</b>
4.1	Introduction . . . . .	91
4.2	Etat de l'art en partitionnement de maillages . . . . .	91
4.3	Algorithme général . . . . .	93
4.4	Grandes étapes de notre algorithme de segmentation . . . . .	95
4.4.1	Analyse multirésolution globale de l'objet semi-régulier . . . . .	97
4.4.2	Classification des mesures ondelettes par la méthode du K-Means . . . . .	97
4.4.3	Segmentation initiale construite par croissance de régions . . . . .	98
4.4.4	Amélioration de la segmentation en fonction de la règle d'agrégation considérée . . . . .	99
4.4.5	Projection finale vers l'objet semi-régulier d'origine . . . . .	101
4.4.6	Temps d'exécution des différentes étapes de la segmentation . . . . .	101
4.5	Résultats expérimentaux et applications . . . . .	102
4.5.1	Statistiques sur les segmentations obtenues . . . . .	104
4.5.2	Evaluation de la segmentation . . . . .	105
4.6	Conclusion . . . . .	109
<b>5</b>	<b>Décomposition adaptative de maillages surfaciques</b> . . . . .	<b>111</b>
5.1	Introduction . . . . .	111
5.2	Compression par parties pour la transmission et la visualisation sélectives . . . . .	112
5.2.1	Compression sans perte . . . . .	112
5.2.2	Compression progressive basée sur la décomposition en ondelettes . . . . .	114
5.3	Principes de notre algorithme de compression adaptative . . . . .	117
5.3.1	Schéma général de notre "framework" . . . . .	117
5.3.2	Principe de l'analyse en ondelettes séparée sur chaque patch . . . . .	118
5.3.3	Décomposition locale en ondelettes et gestion des bords . . . . .	122
5.3.4	Codage zerotree et entropique indépendants . . . . .	125

5.3.5	Quantification et allocation binaire différenciées pour chaque patch	128
5.3.6	Décodage séparé de chaque fichier d'ondelettes . . . . .	130
5.3.7	"Recollage des patches" et synthèse locale . . . . .	134
5.4	Nouveaux schémas de prédiction envisagés . . . . .	134
5.4.1	Principe des schémas originaux s'appliquant sur des structures irrégulières . . . . .	135
5.4.2	Principes généraux considérés par les deux approches . . . . .	136
5.4.3	Principe de la seconde approche . . . . .	137
5.4.4	Notre adaptation de ces relaxations . . . . .	138
5.5	Résultats et applications possibles de notre "framework" . . . . .	140
5.5.1	Ordre de grandeur des informations additionnelles à coder . . . . .	141
5.5.2	Analyse multirésolution séparée sur un objet de synthèse . . . . .	143
5.5.3	Autres exemples d'applications possibles . . . . .	143
5.5.4	Comparaison des reconstructions avec plusieurs métriques différentes . . . . .	148
5.6	Conclusion . . . . .	149
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>151</b>
	<b>Annexes</b>	<b>159</b>
A.1	Présentation de la librairie CGAL . . . . .	159
A.2	Nos choix d'implémentation : noyau et structures de données utilisés . . . . .	160
A.2.1	Représentation des objets géométriques . . . . .	160
A.2.2	Représentation des polyèdres dans CGAL . . . . .	160
A.2.3	Subdivision . . . . .	162
A.2.4	Analyse et synthèse en ondelettes . . . . .	162
A.3	Maillages surfaciques triangulaires utilisés dans ce mémoire . . . . .	164
	<b>Bibliographie</b>	<b>174</b>
	<b>Publications</b>	<b>175</b>



---

## Table des figures

1	Numérisation du "David", à l'aide d'un scanner 3D, dans le cadre du projet <i>Michelangelo</i> [70]. . . . .	3
2	Décomposition multi-résolution du modèle "Venus". . . . .	5
3	Représentation tridimensionnelle du découpage du modèle "Venus" en plusieurs parties. . . . .	6
4	Diagramme présentant les grandes étapes de notre algorithme de compression adaptative. . . . .	6
5	Illustration de notre algorithme de segmentation ondelettes sur l'objet "Venus". . . . .	7
1.1	Exemple de maillage surfacique triangulaire. . . . .	9
1.2	Exemple de représentation naïve d'un octaèdre. . . . .	12
1.3	Principe général de la compression d'un signal quelconque. . . . .	13
1.4	Principes de la prédiction différentielle, linéaire et par la règle du parallélogramme. Image tirée de [90]. . . . .	14
1.5	Analyse spectrale d'un maillage 3D contenant cinq sommets. . . . .	16
1.6	Illustration du pavage du plan temps-fréquence après une décomposition en ondelettes. . . . .	18
1.7	Filtrage d'un signal, suivi d'un sous-échantillonnage par 2. . . . .	21
1.8	Représentation schématique des bases de fonctions d'échelle et d'ondelettes, après décomposition d'un signal 1D. . . . .	21
1.9	Construction des espaces de fonctions d'échelle, à partir de la résolution inférieure. . . . .	22
1.10	Décomposition en ondelettes d'un maillage surfacique triangulaire. . . . .	22
1.11	Illustration de l'aspect hiérarchique de la subdivision canonique de facettes. . . . .	23
1.12	Masques de subdivision linéaire dans le cas régulier. . . . .	24
1.13	Schéma de subdivision de Loop. . . . .	24
1.14	Subdivision d'un tétraèdre par deux différents masques de Butterfly. . . . .	25
1.15	Représentation 3D des fonctions d'échelles associées à différents masques Butterfly. . . . .	25
1.16	Masques utilisés dans les subdivisions de Loop et de Butterfly au niveau des bords des maillages ouverts. . . . .	25
1.17	Diagrammes illustrant l'approche par bancs de filtres et le lifting scheme. . . . .	26
1.18	Schématisation de l'étape de "mise à jour des ondelettes", par combinaison linéaire. . . . .	27
1.19	Grandes étapes du codage zerotree, après transformation du signal. . . . .	28
1.20	Exemple d'arbres de zéros définis sur la transformée en ondelettes d'une image. . . . .	29



1.21	Grandes étapes du codage contextuel utilisé par JPEG2000, après transformation du signal. . . . .	30
1.22	Association liant les arêtes d'un maillage multirésolution, utilisée par le codage zerotree. Image tirée de [58]. . . . .	30
2.1	Comparaison entre connectivités irrégulière, semi-régulière et régulière. . . . .	33
2.2	Illustration de la correspondance entre un domaine planaire et un maillage plongé dans l'espace tridimensionnel. . . . .	39
2.3	Illustration des grandes phases de l'algorithme de Gu <i>et al.</i> [38]. . . . .	41
2.4	Illustration du procédé de reconstruction par images géométriques. Image tirée de [38]. . . . .	41
2.5	Grandes étapes utilisées pour le remaillage d'un objet irrégulier transformé en une structure semi-régulière. Schéma tiré de [110]. . . . .	42
2.6	Représentation d'une carte harmonique permettant la minimisation d'une énergie élastique associée à un maillage. . . . .	44
2.7	Etape de construction du domaine paramétrique de base dans la méthode de Eck <i>et al.</i> [25]. . . . .	45
2.8	Etape de construction du domaine paramétrique de base dans la méthode de Gioia [34]. . . . .	46
2.9	Comparaison des reconstructions produites sur l'objet fandisk par les méthodes de Eck <i>et al.</i> [25] et Gioia <i>et al.</i> [34]. . . . .	46
2.10	Aperçu de l'algorithme MAPS sur le modèle "Horse". Images tirées de [67]. . . . .	47
2.11	Schéma représentant la contraction d'arête et de demi-arête. . . . .	48
2.12	Comparaison des paramétrisations produites par différents algorithmes. Images tirées de [57]. . . . .	50
2.13	Schématisation 2D des erreurs d'approximation produites par des courbes "normales" interpolantes et approximantes. Images tirées de [30]. . . . .	51
2.14	Histogramme de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes obtenus par la transformée de Loop, sur l'objet "Venus". . . . .	52
2.15	Illustration de la méthode d'orthogonalisation des ondelettes avec les fonctions d'échelles, pour différents voisinages autour du nouveau sommet à prédire. . . . .	55
2.16	Diagramme d'enchaînement des étapes du schéma lifting, basé sur le filtre approximant de Loop. . . . .	55
2.17	Simplifications du modèle "Horse" résultant de l'analyse multirésolution interpolante. . . . .	56
2.18	Simplifications du modèle "Horse" résultant de l'analyse multirésolution approximante. . . . .	56
3.1	Comparaison des paramétrisations produites par une subdivision de Loop et par l'algorithme GSP [57]. Images tirées de [57]. . . . .	62
3.2	Zoom sur deux parties caractéristiques du modèle "Rabbit" semi-régulier (remaillé par MAPS) et son complexe de base associé. . . . .	62
3.3	Zoom sur deux parties caractéristiques du modèle "Rabbit" semi-régulier (remaillé par NM) et son complexe de base associé. . . . .	63
3.4	Zoom sur deux parties caractéristiques du modèle "Rabbit" semi-régulier (remaillé par NM2) et son complexe de base associé. . . . .	63
3.5	Grandes étapes utilisées lors de la création d'un maillage normal, pour l'objet "Molecule". Image tirée de [44]. . . . .	64

3.6	Comparaison du remaillage produit par l'algorithme <i>MAPS</i> avec les subdivisions de Loop et midpoint. Image tirée de [67]. . . . .	64
3.7	Comparaison de la reconstruction sur les quatre premiers niveaux d'un objet de synthèse avec les algorithmes <i>NM</i> et son extension variationnelle [30]. Image tirée de [30]. . . . .	65
3.8	Schéma lifting à quatre canaux que nous avons utilisé pour l'analyse multirésolution de maillages. . . . .	67
3.9	Masques utilisés pour la prédiction d'un nouveau sommet, dans le cas où ses deux sommets voisins sont réguliers (à gauche) ou irréguliers (au milieu : extension de Zorin <i>et al.</i> [129], à droite : notre extension). . . . .	67
3.10	Comparaison du lissage du modèle Nefertiti par différentes variantes du schéma de subdivision Butterfly. . . . .	68
3.11	Zoom sur une partie du modèle Nefertiti, subdivisé par différentes variantes du masque Butterfly. . . . .	69
3.12	Distribution de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes sur l'objet "Venus" dans un repère global ou local. Images tirées de <i>PGC</i> [58] et <i>CNM</i> [56]. . . . .	69
3.13	Répartition spatiale des ondelettes et de leurs projections dans un repère local, sur les quatre premiers niveaux de décomposition de l'objet "Venus" remaillé par <i>MAPS</i> . . . . .	71
3.14	Répartition spatiale des ondelettes et de leurs coordonnées dans deux repères différents, sur les deux premiers niveaux de décomposition de l'objet "Venus" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	71
3.15	Distributions des coordonnées des coefficients d'ondelettes, obtenues dans un repère global ou local sur l'objet "Venus" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	72
3.16	Comparaison des courbes débit/distorsion produites en considérant deux schémas de subdivision, où les ondelettes associées sont projetées dans un repère global ou local, sur l'objet "Venus" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	73
3.17	Approximations du modèle "Venus" remaillé par <i>NM</i> à différents débits. . . . .	74
3.18	Reconstructions de l'objet "Venus" remaillé par <i>NM</i> lorsque les ondelettes d'un des niveaux de résolution ne sont pas considérées. . . . .	75
3.19	Expression de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes selon deux considérations différentes. . . . .	77
3.20	Répartition de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes sur le premier niveau de décomposition de l'objet "Venus" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	78
3.21	Répartition de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes sur le quatrième niveau de décomposition de l'objet "Venus" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	78
3.22	Calcul de l'agrégation des coefficients de résolution inférieure ou égale à $n$ , dans le voisinage d'un sommet $v_n$ ajouté au niveau $n$ . . . . .	80
3.23	Calcul de l'agrégation des coefficients de résolution inférieure ou égale à $n$ , dans le voisinage d'un sommet $v_n$ ajouté à un niveau de décomposition inférieur à $n$ . . . . .	81
3.24	Calcul de l'agrégation des coefficients de résolution supérieure ou égale à $n$ , dans le voisinage d'un sommet $v_n$ . . . . .	81
3.25	Distribution de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes à différents niveaux de résolution sur le modèle "Venus" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	83

3.26	Distribution de l'amplitude des coefficients d'ondelettes sur le modèle "Horse" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	84
3.27	Distribution de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes à différents niveaux de résolution sur le modèle "Venus" remaillé par <i>MAPS</i> . . . . .	84
3.28	Distribution de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes à différents niveaux de résolution sur le modèle "Feline" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	85
3.29	Champs de courbure pour l'objet "Avion". Image tirée de [62]. . . . .	86
3.30	Comparaison de plusieurs mesures, obtenues à partir du tenseur de courbure, basé sur les estimateurs de Cohen-Steiner <i>et al.</i> [19], sur le premier niveau de décomposition de l'objet "Venus" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	88
3.31	Comparaison de la distribution de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes sur la première approximation de l'objet "Venus" remaillé par les algorithmes <i>MAPS</i> et <i>NM</i> et analysé par les subdivisions Butterfly et midpoint. . . . .	88
4.1	Schématisation des grandes étapes de l'algorithme de Lavoué <i>et al.</i> [63] pour la segmentation et la rectification de frontières. Image tirée de [62]. . . . .	94
4.2	Grandes étapes de notre algorithme de segmentation. . . . .	94
4.3	Distribution de l'amplitude normalisée des coefficients, associée aux sommets, arêtes ou facettes du premier niveau d'approximation de l'objet "Venus" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	95
4.4	Distribution de l'amplitude normalisée des coefficients, associée aux sommets, arêtes ou facettes du premier niveau d'approximation de l'objet "Horse" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	96
4.5	Illustration de la première étape d'analyse par schéma lifting sur le modèle "Venus" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	97
4.6	Exemple de la détermination du cluster d'appartenance d'une facette grossière en fonction de ses quatre facettes filles. . . . .	100
4.7	Exemple de la détermination du cluster d'appartenance pour un ensemble de facettes, après utilisation de notre règle de projection sur trois simplifications successives. . . . .	100
4.8	Distribution de l'amplitude normalisée des coefficients, sur des approximations fine et grossière de l'objet "Venus" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	103
4.9	Etapes de la segmentation basée sur l'amplitude normalisée des coefficients, moyennée sur l'ensemble de la hiérarchie de l'objet "Horse" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	103
4.10	Etapes de la segmentation basée sur l'amplitude normalisée des coefficients, moyennée sur l'ensemble de la hiérarchie de l'objet "Feline" remaillé par <i>NM</i> . . . . .	103
4.11	Comparaison de la segmentation basée sur l'amplitude normalisée des coefficients sur des approximations fine et grossière de l'objet "Venus" remaillé par <i>MAPS</i> . . . . .	104
4.12	Classification et segmentation basées sur la composante normale et l'angle polaire des coefficients de l'objet "Venus" remaillé par <i>MAPS</i> . . . . .	104
4.13	Etapes de la segmentation basée sur l'amplitude et l'angle polaire normalisés des coefficients, moyennés sur l'ensemble de la hiérarchie de l'objet Bunny remaillé par <i>MAPS</i> . . . . .	105

4.14	Étapes de la segmentation basée sur l'amplitude et l'angle polaire normalisés des coefficients, moyennés sur l'ensemble de la hiérarchie de l'objet "Skull" remaillé par NM. . . . .	106
4.15	Étapes de la segmentation basée sur l'amplitude et l'angle polaire normalisés des coefficients, moyennés sur l'ensemble de la hiérarchie de l'objet "Dino" remaillé par NM. . . . .	107
5.1	Représentation schématisée de la couverture des arbres basés arêtes utilisés pour le codage des coefficients d'ondelettes sous forme de zerotrees. Schéma tiré de [110]. . . . .	116
5.2	Principales caractéristiques et étapes de notre algorithme de compression adaptative. . . . .	117
5.3	Maillage remaillé de façon adaptative et sa représentation hiérarchique correspondante. Images tirées de [51] . . . . .	119
5.4	Configurations rencontrées à la frontière des régions surfaciques obtenues par segmentation et schématisation des méthodes envisagées pour compléter les "sommets manquants" par symétrie. . . . .	124
5.5	Comparaison des distributions de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes, obtenus par analyse locale et par différentes considérations en bordure de patches, sur l'objet "Venus" remaillé par NM. . . .	126
5.6	Comparaison des courbes débit/distorsion sur les quatre patches non lisses, produits par segmentation de l'objet "Venus", analysé localement en utilisant les trois types de considérations différentes en bordure de patches. . .	127
5.7	Schéma détaillé, illustrant les grandes étapes de notre "framework" d'analyse et de synthèse locales. . . . .	133
5.8	Voisinage d'une arête $e = (j, k)$ , considéré dans le calcul de la relaxation non uniforme de Guskov <i>et al.</i> [43]. . . . .	136
5.9	Illustration de l'opérateur de séparation de sommet (inverse de la contraction d'arête), intervenant dans la construction des PM [45]. . . . .	136
5.10	Illustration du concept de $K_i$ -gon régulier sur un maillage planaire ou une 2-variété. Image tirée de [59]. . . . .	138
5.11	Comparaison du lissage sur l'oeil du modèle "Mannequin" avec le schéma non uniforme de Guskov <i>et al.</i> [43] et un schéma semi-uniforme. Image tirée de [43]. . . . .	139
5.12	Comparaison de la subdivision (sur 4 niveaux) produite par le filtre de Butterfly de Zorin <i>et al.</i> [129] et par notre adaptation de la technique de relaxation de Guskov <i>et al.</i> [43]. . . . .	139
5.13	Comparaison des courbes débit/distorsion (à haut débit) sur l'objet Venus, entre une prédiction réalisée par le filtre de Butterfly de Zorin <i>et al.</i> [129] (BIM) et notre adaptation de la technique de relaxation de Guskov <i>et al.</i> [43]. . . . .	141
5.14	Comparaison des courbes débit/distorsion entre les méthodes globale et locale, pour les modèles 3D usuels remaillés par l'algorithme NM ou MAPS. . . . .	142
5.15	Illustration des étapes de segmentation d'un modèle synthétique produit à partir d'un polyèdre de base. . . . .	144
5.16	Comparaison des courbes débit/distorsion obtenues en utilisant une analyse ondelettes globale ou locale sur un objet de synthèse. . . . .	144
5.17	Reconstructions possibles de deux objets 3D avec notre "framework" local, pour un codage des 12 premiers plans de bits de la géométrie. . . . .	146

5.18	Comparaison de la taille du fichier compressé pour le modèle "Horse" reconstruit avec les méthodes d'analyse globale (en haut) et locale (en bas).	147
5.19	Détails de la reconstruction du modèle "Horse" basée sur des considérations globale et locale, pour une erreur de reconstruction similaire. . . . .	148
A.20	Structure de donnée basée sur les demi-arêtes, utilisée par la classe CGAL : :Polyhedron_3. . . . .	161
A.21	Copie d'écran de notre application présentant les coefficients d'ondelettes associées à deux maillages de même niveau de résolution, sous forme de champs de vecteurs. . . . .	163
A.22	Maillages utilisés dans ce document, dans le cadre de l'analyse multirésolution. . . . .	165

---

## Liste des tableaux

3.1	Comparaison de la distorsion produite par différents algorithmes de remaillage sur l'objet "Rabbit". . . . .	60
3.2	Comparaison de la distorsion produite par différents algorithmes de remaillage sur les objets "Horse" et "Venus". . . . .	66
3.3	Comparaison de la taille comprimée et de l'erreur produite $d_H$ (distance de Hausdorff) lorsqu'on élimine les coefficients d'ondelettes sur certains niveaux de résolution de l'objet "Venus". . . . .	76
4.1	Temps d'exécution (en secondes) des différentes étapes de notre algorithme de segmentation, sur les objets remaillés par <i>NM</i> . . . . .	102
4.2	Statistiques issues de nos règles de segmentation sur les modèles usuels. . . . .	108
5.1	Comparaison de la taille des fichiers de compression ondelettes (en Ko) pour les objets usuels (remaillés par <i>NM</i> ), lorsque les coordonnées du maillage grossier sont répétés ou non dans les différentes partitions. . . . .	121
5.2	Comparaison de la taille des fichiers de compression ondelettes (en Ko) pour les objets usuels (remaillés par <i>NM</i> ), lorsque les coordonnées des ondelettes sont répétés ou non dans les différentes partitions. . . . .	122
5.3	Comparaison de la taille des fichiers de compression ondelettes (en Ko) et de la distorsion produite lors de la reconstruction des objets usuels (remaillés par <i>NM</i> ), suivant les trois considérations différentes envisagées aux frontières des partitions. . . . .	125
5.4	Comparaison de la distorsion produite lors de la reconstruction de l'objet "Venus" (remaillés par <i>NM</i> ), pour une même taille de compression (94 Ko) en considérant plusieurs allocations binaires au niveau des patches. . . . .	131
5.5	Comparaison de la distorsion produite lors de la reconstruction de l'objet "Horse" (remaillés par <i>NM</i> ), pour une même taille de compression (34 Ko) en considérant plusieurs allocations binaires au niveau des patches. . . . .	132
5.6	Comparaison de la taille des fichiers de compression ondelettes (en Ko) et de la distorsion produite après analyse multirésolution globale, sur les objets usuels (remaillés par <i>NM</i> ). Les prédictions considérées sont le masque Butterfly non lifté usuel (BIM) et ses adaptations considérées ( <i>relax1</i> et <i>relax2</i> ). . . . .	140
5.7	Temps d'exécution (en secondes) des différentes étapes de notre "framework", pour les objets remaillés par l'algorithme <i>NM</i> . . . . .	143
A.8	Caractéristiques principales des maillages utilisés dans ce document (dans le cadre de l'analyse multirésolution). . . . .	164



---

# Abbréviations

## Mesures de qualité

- *EQM* : Erreur Quadratique Moyenne (*MSE* en anglais).
- *erreur  $L^2$*  (ou *RMSE* : *Root Mean Squared Error*) : erreur géométrique calculée entre deux surfaces  $X$  et  $Y$  :  $d(X, Y)$ , indépendamment de leur topologie. Pour la calculer on cherche tout d'abord à exprimer  $d(x, Y)$  représentant la distance euclidienne entre un point  $x$  de la surface  $X$  et le point le plus proche de la surface  $Y$ , pour tous les points de  $X$ . L'erreur  $L^2$  est alors exprimée de la façon suivante :

$$d(X, Y) = \left( \frac{1}{\text{area}(X)} \int_{x \in X} d(x, Y)^2 dx \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Elle correspond à la distance de Hausdorff (ou distance surface-surface) si l'on considère la valeur maximum entre  $d(X, Y)$  et  $d(Y, X)$ , car ces mesures ne sont pas symétriques.

- *PSNR* : Pic Signal to Noise Ratio (*PRSB* en français : Pic du Rapport Signal à Bruit), exprimé en décibels (dB). Le PSNR est un critère objectif qui permet d'estimer la qualité visuelle d'un maillage reconstruit  $Y$  par rapport au maillage original de référence  $X$ , par exemple. Il est donné par la formule :

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} BBdiag/d$$

où *BBdiag* désigne la diagonale de la boîte englobante du modèle original et  $d$  la distance de Hausdorff entre les deux surfaces  $X$  et  $Y$  à comparer.

## Méthodes de référence

- Méthodes de remaillage semi-régulier :
  - *MAPS* (*Multiresolution Adaptive Parameterization of Surfaces*) : méthode de remaillage de Lee *et al.* [67].
  - *NM* (*Normal Meshes*) : méthode de "remaillage normal" de Guskov *et al.* [44].
  - *GSP* (*Globally Smooth Parameterization*) : méthode de paramétrisation de Khodakovsky *et al.* [57].
  - *NM2* : méthode de "remaillage normal" de Yang *et al.* [126].
  - *NM3* : méthode de "remaillage normal" de Sim *et al.* [110].
- Méthodes de compression :
  - *PM* (*Progressive Meshes*) : méthode de compression progressive de Hoppe [45].
  - *PGC* (*Progressive Geometry Compression*) : méthode de compression géométrique de Khodakovsky *et al.* [58].



- *CNM (Compression of Normal Meshes)* : méthode de compression géométrique de Khodakovsky et Guskov [56].
- *TMC (Triangle Mesh Compression)* : méthode de compression monorésolution de Touma et Gotsman [121].
- *SPIHT (Set Partitioning In Hierarchical Trees)* : méthode de codage d'une image décomposée en ondelettes de Said et Pearlman [102]. Méthode étendue pour les maillages par Khodakovsky *et al.* [58].

# **Introduction générale**



Grâce aux dernières avancées des techniques d'échantillonnage, les images, sons et vidéos numériques font maintenant largement partie de notre quotidien. Plus récemment, le développement de l'infographie et de la vision tridimensionnelle a ouvert la voie à la modélisation d'objets ou de scènes complexes en trois dimensions. Enfin, le développement actuel de l'Internet et des réseaux de télécommunication favorise l'échange de tels modèles, qui sont ainsi utilisés dans des domaines aussi variés que la médecine, la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), la réalité augmentée, les visites ou expériences virtuelles, les jeux vidéos, le cinéma d'animation ou enfin la simulation numérique.

L'enjeu principal lors de la modélisation de ce type d'objets est de dissimuler à l'utilisateur la discrétisation du signal perçu par celui-ci sous forme continue. Actuellement, les modèles géométriques 3D sont le plus souvent représentés sous forme de maillages surfaciques triangulaires grâce à leur simplicité et leur efficacité. Le modèle original est alors approximé par une surface linéaire par morceaux constituée d'un ensemble de facettes triangulaires planes. Pour répondre à l'enjeu évoqué précédemment, les échantillons doivent alors être convenablement répartis en fonction de la courbure de l'objet, comme nous le verrons au premier chapitre. Enfin, la modélisation sous forme de maillage surfacique est très adaptée à un grand nombre d'applications et permet également un processus de rendu efficace par les cartes graphiques actuelles.

La complexité de ces modèles a récemment augmenté grâce aux progrès des techniques et du matériel d'acquisition (dont un exemple est illustré par la figure 1) et de conception. Il est ainsi possible de sélectionner un grand nombre d'échantillons sur la surface de ces objets, surtout dans les parties très détaillées ou à forte courbure, afin de répondre aux attentes de réalisme imposées par les applications cibles. Ceci implique pour ces dernières de toujours avoir à l'esprit le compromis nécessaire entre la complexité du modèle et l'efficacité de la reconstruction.

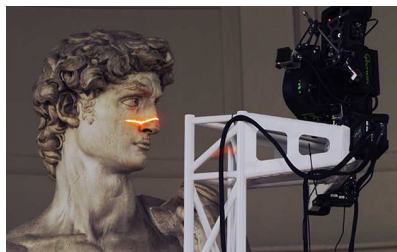


FIG. 1 – Numérisation du "David", à l'aide d'un scanner 3D, dans le cadre du projet *Michelangelo* [70]. Ce projet a permis la production de modèles 3D pour l'ensemble des sculptures et de l'architecture de Michel Ange.

En plus de cette information géométrique, les maillages renferment également une information topologique (appelée également connectivité), qui traduit la manière dont les sommets sont connectés entre eux. L'ensemble représente alors une grande quantité d'informations à conserver pour obtenir une modélisation précise et détaillée. Bien que les espaces de stockage des ordinateurs et la vitesse de transmission des réseaux ne cessent d'augmenter, il paraît indispensable de disposer de techniques de compression efficaces pour stocker, échanger et même visualiser de tels objets.

Certaines applications professionnelles, comme l'imagerie médicale, manipulent des données sensibles pour lesquelles la perte d'information n'est en général pas tolérée ou sous réserve de certaines garanties. Des méthodes de compression sans perte, qui proposent une reconstruction exacte de l'information, sont alors le plus souvent utilisées. Ces techniques se caractérisent par une réorganisation de l'information et sont les premières à avoir été proposées pour la compression d'objets 3D. Mais dans la majorité des cas, il est possible d'obtenir des taux de compression bien meilleurs en s'autorisant quelques pertes que l'on cherche à dissimuler. Pour cela, on utilise généralement l'espace fréquentiel dans lequel les informations sont naturellement moins corrélées et où il est possible d'en réduire fortement certaines sans que cela soit trop perceptible.

L'obtention d'une séquence de bits de taille minimale n'est pas le seul objectif visé par les applications manipulant les maillages. En effet, un des enjeux actuels est de proposer une adaptation du transfert de ces données aux ressources à disposition (type de réseau et nature des terminaux utilisés pour la visualisation) et aux diverses demandes de l'utilisateur. Ainsi les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans la problématique de la compression et la transmission progressive de données tridimensionnelles afin de promouvoir l'échange de ces données tout en participant à l'amélioration de la qualité de service proposée à l'utilisateur. Les points critiques apparaissent aussi bien dans le transfert de ces informations (qui doivent être adaptées au débit du réseau ainsi qu'à la capacité de stockage et de visualisation du terminal utilisateur) que dans leur consultation efficace, flexible et adaptative.

Des techniques de décomposition multirésolution sont généralement utilisées dans ces cas de figure, car elles fournissent une représentation "scalable" de ces modèles géométriques, telle qu'illustrée à la figure 2. Ainsi, suivant le débit du réseau servant à l'acheminement des données vers le client, l'un de ces niveaux de détails (LoD : Level of Detail) peut se substituer à l'objet compressé, à un instant  $t$  donné, en attendant que la totalité des informations ait été transmise. L'utilisateur peut alors disposer d'une approximation globale de l'objet durant toute la phase de transmission de la trame binaire. Ce processus de transfert peut également être interrompu à tout moment par l'utilisateur ou si la taille des données dépasse un seuil critique ne permettant pas au terminal client d'assurer correctement le rendu ou la manipulation de l'objet. Ces méthodes de décomposition utilisent majoritairement une transformée en ondelettes, outil d'analyse performant et robuste qui a fait ses preuves en terme de compression d'images et de maillages puisqu'il a notamment été intégré dans les normes JPEG2000 [27] et MPEG4 [5]. Cette représentation hiérarchique est également très adaptée pour le débruitage, le filtrage, le tatouage ou l'édition de maillages.

Deux approches différentes sont habituellement envisagées pour réaliser une telle décomposition en ondelettes. La première est capable de s'adapter directement à la structure topologique irrégulière des maillages (issus de la numérisation ou de la modélisation CAO), où chaque sommet possède un nombre variable de voisins. L'avantage est de pouvoir proposer une compression sans perte du modèle numérique. La seconde tire parti d'un prétraitement appelé remaillage, où un nouvel échantillonnage de la surface de l'objet permet de le transformer en une structure semi-régulière. Ainsi chaque sommet (hormis un faible nombre) est cette fois-ci régulier en terme de connectivité, c'est-à-dire relié à un même nombre de voisins.

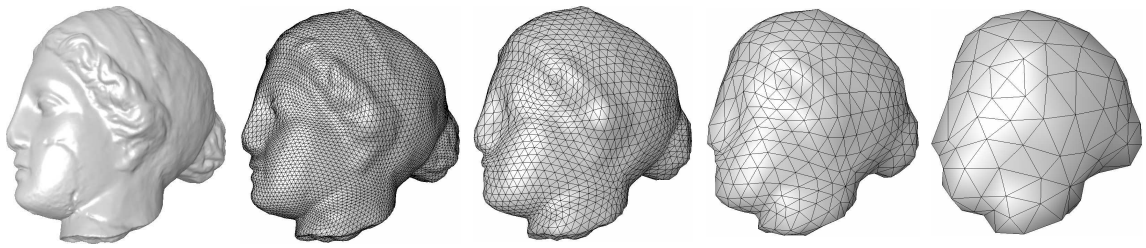


FIG. 2 – Décomposition multi-résolution du modèle "Venus". Le premier maillage correspond à l'objet d'origine, décomposé par subdivision inverse où à chaque étape le nombre de triangles est divisé par 4.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet "CoSurf" (Compression de Surfaces), résultant de la collaboration entre l'équipe M2DisCo du laboratoire LIRIS et l'équipe d'Orange Labs de Rennes, représentée par Patrick Gioia. Ce projet a été créé dans le but de proposer une nouvelle méthode de compression et de transmission progressives de données tridimensionnelles, modélisées sous forme de maillages surfaciques triangulaires. Notre méthode d'analyse se base sur les ondelettes de subdivision, selon le schéma proposé dans MPEG-4 [5], qui se base sur un remaillage préalable des objets avant leur décomposition. Ce choix a tout d'abord été motivé par une volonté d'utiliser les formats de données 3D standards, indispensables à la large diffusion et utilisation des logiciels de traitement de ces informations. De plus, étant donné que les applications visées n'imposent pas un schéma de compression sans perte, une représentation semi-régulière des modèles permet de minimiser les informations paramétriques et topologiques à coder, pour de meilleurs taux de compression. Un autre grand avantage est la possibilité de bénéficier de structures de données et d'algorithmes plus efficaces, se rapprochant de ceux utilisés pour compresser les données échantillonnées sur des grilles régulières (*cf.* sons, images, vidéos ...).

La majorité des techniques de compression progressive de maillages par ondelettes utilise une projection globale des maillages dans un espace transformé. Celles-ci cherchent alors très rarement à adapter la décomposition en ondelettes et la quantification des coefficients à la courbure, la rugosité ou la direction des textures caractérisant la surface des objets. Les coefficients dépendent ainsi principalement de l'algorithme de remaillage considéré et du pouvoir de prédiction des fonctions d'échelles appliquées. Sachant que les surfaces de subdivision (utilisées généralement comme fonctions d'échelles) génèrent une surface résultante lisse, une prédiction optimisée pourrait être considérée pour les parties plus rugueuses (texturées), les arêtes vives, les coins ... Notre approche se démarque des techniques existantes, puisqu'elle s'appuie sur une segmentation préalable de la surface en régions d'amplitudes fréquentielles variables. Les partitions connexes résultantes, illustrées sur l'exemple de la figure 3, peuvent ainsi être traitées indépendamment durant la décomposition en ondelettes, afin de choisir le schéma le plus adapté aux caractéristiques surfaciques locales des maillages et ainsi réduire les informations à coder. La contribution visuelle à l'ensemble de la surface est également un des points importants à considérer dans la phase d'optimisation des bits alloués à chacun des patches.

Les grandes étapes de cette chaîne de compression/décompression adaptative sont présentées sur le diagramme de la figure 4. Notre algorithme considère en entrée des

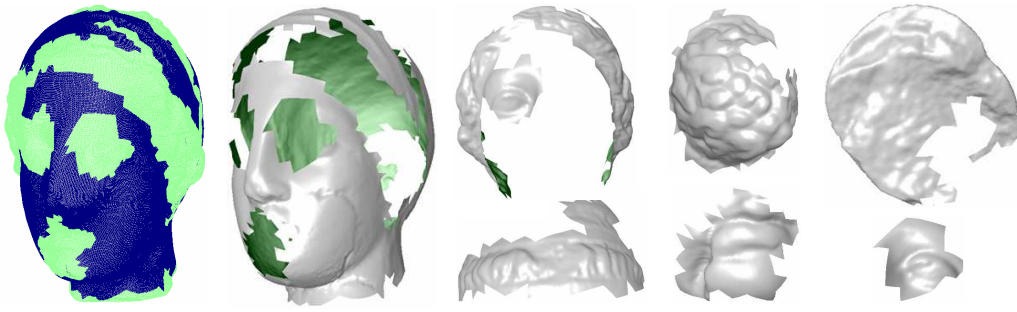


FIG. 3 – Représentation tridimensionnelle du découpage du modèle "Venus" en plusieurs parties. La première illustration représente la classification préalable du maillage en deux classes (ou clusters), permettant le découpage en 7 partitions connexes (illustrées séparément).

modèles semi-réguliers ( $M_{sr}$  sur le diagramme) issus du remaillage des objets irréguliers d'origine  $M_{ir}$ . Une première décomposition en ondelettes globale de  $M_{sr}$  en  $n$  maillages plus grossiers  $M_1, M_2 \dots M_n$ , permet d'analyser les variations fréquentielles sur l'ensemble de la surface. Ces informations sont ensuite utilisées pour produire une segmentation basée fréquences, qui distingue les régions lisses de celles ayant un aspect plus bruité ou rugueux. Les partitions connexes résultantes peuvent alors être décomposées et codées indépendamment, afin de s'adapter aux spécificités fréquentielles locales. Du côté client, durant le décodage séparé de chaque région, les sous-maillages issus du niveau de résolution le plus grossier sont d'abord "recollés" avant de procéder au raffinement de chaque région de manière indépendante (par synthèse ondelettes). La reconstruction ainsi obtenue peut enfin être comparée à l'objet d'origine en terme de distorsion géométrique.

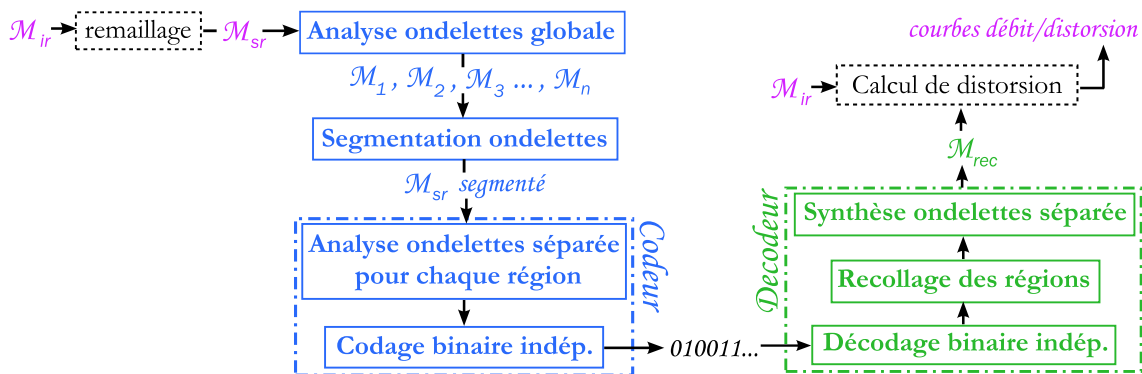


FIG. 4 – Grandes étapes de notre algorithme de compression adaptative, basé sur une segmentation préalable afin de coder localement un maillage semi-régulier  $M_{sr}$  (produit par remaillage de l'objet irrégulier d'origine  $M_{ir}$ ). Ce traitement permet une reconstruction  $M_{rec}$  robuste et efficace du côté client.

La suite de ce document est structurée comme suit. Nous présentons en premier lieu les notions générales concernant les domaines d'applications des objets 3D et leurs diverses représentations. Nous poursuivons par la description des différents principes utilisés lors du processus de compression 3D. Nous nous arrêtons plus particulièrement, au second chapitre, sur les fondements théoriques et les principaux algorithmes de compression scalable de la littérature utilisant une projection des surfaces dans un espace

transformé.

Le troisième chapitre présente l'étude et la comparaison de plusieurs schémas d'analyse multirésolution basés sur les ondelettes de subdivision, dans le but de sélectionner celui pour lequel la répartition spatiale des coefficients traduit au mieux les variations fréquentielles de la surface. Pour cela, nous avons étudié les différentes distributions des coefficients, pour des objets semi-réguliers plus ou moins bruités, produits par plusieurs remailleurs. Ces multiples comparaisons, associées à l'étude statistique de plusieurs caractéristiques des coefficients nous ont permis de déterminer les meilleurs configurations à choisir pour envisager une segmentation basée fréquences.

Le quatrième chapitre présente cette nouvelle méthode de segmentation de maillages 3D que nous avons développée. Elle se base sur les schémas d'analyse étudiés précédemment afin de séparer les régions surfaciques lisses de celles présentant un aspect rugueux. Cette différenciation fréquentielle permet souvent un repérage des parties sémantiques de l'objet, que nous avons exploité pour la compression, la transmission et la visualisation adaptative, mais qui pourrait également être utilisé pour l'indexation de ces modèles. Les grandes étapes permettant d'aboutir à ce type de segmentation sont illustrées par la figure 5.

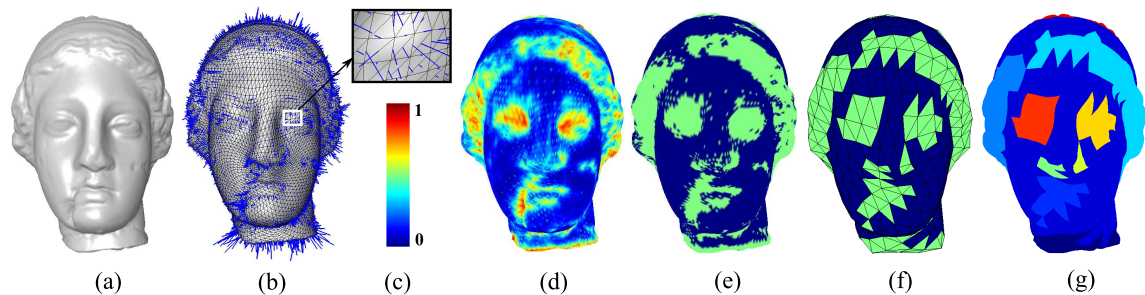


FIG. 5 – Distribution des coefficients d'ondelettes sur l'objet "Venus" remaillé par l'algorithme "Normal Mesh" (NM) et segmentation associée. La décomposition globale de l'objet remaillé (a) produit des coefficients d'ondelettes sous forme de vecteur 3D (représentés en (b) sur un des niveaux de décomposition). La distribution de leur amplitude (d) permet une classification de l'objet en parties lisses (en bleu foncé sur le modèle (e)) et rugueuses (en vert). Une projection de ce partitionnement sur le modèle le plus grossier de la hiérarchie (f) est enfin nécessaire pour pouvoir analyser indépendamment par la suite, les patchs produits (g).

Nous avons finalement proposé une chaîne complète de compression/décompression adaptative, s'appuyant sur la segmentation de l'objet en régions plus simples, telle que décrite précédemment. Ce "framework", détaillé au cinquième chapitre, permet de traiter indépendamment les régions en choisissant le meilleur schéma de compression/décompression adapté à leur aspect surfacique, de manière à améliorer les taux de compression actuels. De plus, l'allocation des bits étant indépendante pour chaque patch, des applications de transmission et de visualisation sélective, en fonction du point de vue de l'utilisateur peuvent alors être envisagées. Enfin, la possibilité d'effectuer des traitements spécifiques sur chacune des partitions, en fonction de son aspect fréquentiel est également un atout pour le débruitage et le tatouage adaptatifs de maillages.





# Cadre de l'étude : la modélisation et la compression 3D

Les modèles géométriques tridimensionnels sont actuellement de plus en plus présents, grâce à l'expansion d'Internet, au développement et la multiplication des réseaux d'accès à haut débit. Leur représentation sous forme de maillage surfacique prédomine à l'heure actuelle.

Contrairement aux images numériques, échantillonnées sur une grille régulière 2D, les échantillons situés sur la surface des modèles géométriques sont généralement répartis de façon irrégulière dans l'espace tridimensionnel, et non pas sur une grille régulière en 3D. Certaines techniques de remaillage positionnent même ces sommets à des endroits bien spécifiques pour refléter au mieux la forme de l'objet de façon compacte. La figure 1.1 montre par exemple très distinctement que plus la courbure de la surface est importante et plus les échantillons sont rapprochés les uns des autres. A cette irrégularité géométrique s'ajoute aussi le fait que ces sommets (reliés entre eux par des polygones) n'ont pas forcément le même nombre de voisins.

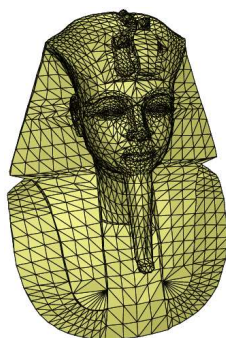


FIG. 1.1 – Exemple de maillage surfacique triangulaire.

C'est ainsi la raison pour laquelle les techniques de traitement d'images sont difficiles à étendre aux maillages. Ceci, ajouté au fait qu'il n'existe pas de technique standard proposant une adaptation de ces objets aux différents types de terminaux existant actuellement, explique entre autre pourquoi il n'est pas encore possible de voir apparaître de façon systématique ce type de statuette en 3D sur les téléphones portables.

Ce chapitre présente à la fois les domaines d'applications des objets tridimensionnels, leur mode d'acquisition, leur modélisation et pour finir, les grands principes des

méthodes de compression avec ou sans pertes de ce type de données. Nous nous attarderons plus longuement sur les fondements de l'analyse multirésolution, puisque nos contributions sont basées sur ce type de transformation.

## 1.1 Domaines d'utilisation des objets 3D

La modélisation d'objets ou de scènes en 3D est intéressante si l'on veut proposer des visites virtuelles de musées, des jeux vidéos ou des films d'animation réalistes, dans lesquels interviennent la modélisation d'environnements réels ou virtuels, l'animation et la navigation temps réels. Les objets 3D sont utilisés également dans des domaines aussi variés que la médecine (aide au diagnostic, chirurgie assistée par ordinateur ou à distance), la conception d'objets industriels ou familiers (CAM : Computer Aided Manufacturing), la réalité augmentée, les systèmes d'information géographiques (cartographie, géologie, astronomie ...) ou encore l'étude et la simulation des phénomènes physiques qui nous entourent. Ce dernier exemple se base sur la simulation numérique en ayant recours à des méthodes d'analyse par éléments finis couplées à une résolution d'équations différentielles. Grâce à ce procédé, il est par exemple possible d'étudier la propagation des ondes électromagnétiques à travers le corps humain, afin d'en mesurer leur dangerosité.

Avant de nous intéresser à l'analyse multirésolution, la compression ou les autres traitements possibles sur ce type d'objets, revenons succinctement sur les méthodes de création des modèles sous-jacents.

## 1.2 Création et modélisation des objets 3D

Pour obtenir une représentation géométrique et topologique d'un objet 3D, il est possible d'utiliser des logiciels spécialisés (logiciels de CAO, modeleurs géométriques ...) ou de numériser des objets réels au moyen d'appareils spécifiques appelés "range scanners". Les données produites par ces derniers appareils (range images ou nuages de points) sont généralement très denses sans forcément tenir compte de la courbure de l'objet, à l'inverse du maillage de la figure 1.1. Ils produisent ainsi une redondance importante, surtout au niveau des zones lisses du maillage, qu'il est possible de réduire grâce à des méthodes de simplification. Les lecteurs intéressés peuvent retrouver une description détaillée de ces dernières dans le livre de Luebke *et al.* [77].

Après la phase d'acquisition des données, plusieurs modélisations sont ensuite possibles, sous forme de maillages surfaciques ou volumiques (représentation de l'objet respectivement par un ensemble de polygones ou de polyèdres), par des nuages de points, des formes à pôles (courbes de Bézier, B-Spline, NURBS ...), des surfaces implicites ou enfin des modèles discrets. Les maillages surfaciques triangulaires sont actuellement le type de représentation le plus utilisé, en passe de devenir un standard pour la modélisation d'objets géométriques. Ils sont composés de  $k$ -simplexes, qui peuvent être des sommets (0-simplexe), des arêtes (segment reliant deux sommets : 1-simplexe) ou des triangles (2-simplexe). On parle alors de surface simpliciale.

Un maillage est une surface linéaire par morceaux qui approxime la surface continue du modèle original par un ensemble de facettes polygonales planes. Cette approxima-

tion linéaire est l'approche la plus simple pour représenter des détails fins. La continuité ainsi produite est de type  $C^0$ . Une telle approximation est caractérisée par une information géométrique qui définit la position des sommets dans l'espace euclidien et une information topologique qui décrit la relation d'adjacence entre les sommets traduisant la manière dont ils sont connectés entre eux (ce nombre est appelé valence ou degré d'un sommet). Pour certains modèles, d'autres informations (ou attributs) peuvent être associées aux sommets (normale, courbure, couleur, information de texture ...) facilitant la modélisation, le rendu et la visualisation des objets.

N'importe quelle forme géométrique de topologie arbitraire (ouverte ou fermée et de n'importe quel genre) peut être représentée par un maillage. Un maillage est qualifié de 2-variété (ou 2-manifold) s'il respecte les propriétés suivantes :

- Propriété du disque local : en chaque point du maillage, il existe une sphère de rayon supérieure à zéro telle que son intersection avec le maillage est homéomorphe à un disque (pour une variété sans bord) ou à un demi-disque (variété avec bords) ;
- Propriété d'ordonnement des arêtes : pour chaque sommet du maillage, ses voisins doivent pouvoir être ordonnés de façon circulaire ;
- 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 un bord.

Une variété est associée à la formule d'Euler-Poincaré, définissant son genre combinatoire  $G$ . Ce dernier correspond au nombre maximum de courbes fermées simples sans point commun que l'on peut tracer à l'intérieur de la surface sans la déconnecter. Le genre d'une 2-variété peut être déterminé sous réserve de connaître le nombre de sommets ( $V$ ), de facettes ( $F$ ), d'arêtes ( $E$ ), de composantes connexes ( $C$ ) et de bords ( $B$ ) de la surface. La formule correspondante est définie de la façon suivante :  $V - E + F + B = 2(C - G)$ . Un maillage "non-manifold" peut être un maillage possédant au moins une arête reliée à au moins trois facettes, mais également un maillage pour lequel il n'est pas possible de distinguer l'intérieur et l'extérieur sans ambiguïté (par exemple la bande de Möbius).

Certaines applications comme la simulation numérique nécessitent que les maillages aient une certaine régularité au niveau topologique, c'est-à-dire que les polygones ne soient pas trop dégénérés. Pour cela, "l'aspect ratio" des triangles (rapport entre les rayons des cercles inscrit et circonscrit) doit être proche de 1 et les angles des quadrilatères doivent être voisins de  $90^\circ$ . La forme des éléments du maillage est en effet importante vu son impact direct sur la stabilité et la fiabilité numérique des traitements réalisés.

C'est pourquoi il existe un grand nombre de méthodes de remaillage, qui procèdent à une redéfinition de la géométrie et de la topologie de plusieurs façons différentes, afin de s'adapter à chaque type d'application. Celles-ci cherchent généralement à produire un meilleur compromis entre distorsion minimale du modèle original et complexité du maillage. Ces techniques sont également très utilisées pour produire des maillages propices à l'application d'une transformée en ondelettes ou d'autres méthodes classiques de traitement du signal, qui ont été récemment adaptées pour les maillages surfaciques et qui sont détaillées au chapitre 2 de ce document.

## 1.3 Les diverses formes de codage des maillages

### 1.3.1 Codage naïf

La représentation naïve d'un maillage polygonal (dont un exemple est présenté à la figure 1.2) consiste à coder les informations géométriques et topologiques respectivement par :

- Une liste de sommets représentés par leurs coordonnées cartésiennes dans l'espace euclidien 3D. Les coordonnées sont généralement codées par des nombres flottants sur 32 bits.
- Une liste de polygones, chacun décrit par les indices de ses sommets dans la liste précédente. Les indices sont généralement codés sur 32 bits.

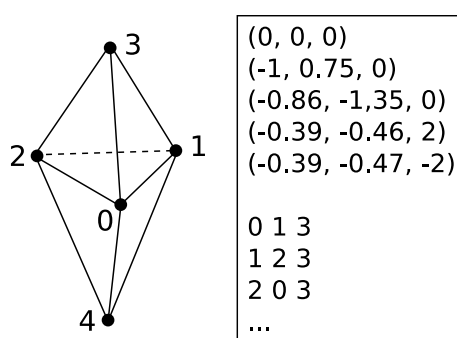


FIG. 1.2 – Exemple de représentation naïve d'un octaèdre.

Il existe plusieurs formats ASCII utilisant cette représentation. Les plus connus sont le langage VRML (Virtual Reality Modeling Language) et le format OFF. Mais on peut également citer X3D (le remplaçant de VRML), InVention (IV), OBJ, PLY, ... Ces formats proposent généralement la possibilité d'inclure des paramètres additionnels tels que les normales, couleurs ou coordonnées de textures.

Ce type de codage s'avère très redondant, vu que la valence d'un sommet est en moyenne égale à six dans un maillage triangulaire (chaque sommet est en moyenne incident à six triangles distincts). Ainsi pour ces maillages, l'indice d'un sommet apparaît en moyenne six fois dans la liste des polygones. Plusieurs méthodes de compression, dont les principales sont présentées par la suite, permettent de réduire cette redondance.

Les machines et les réseaux sont de plus en plus performants et permettent de stocker ou d'échanger un nombre de données de plus en plus important. Mais d'un autre côté, pour répondre aux attentes de réalisme actuelles, les modèles utilisés peuvent, tout comme pour les autres signaux multimédia, atteindre des tailles faramineuses et ne pourraient être échangés ou stockés sans l'existence de techniques de compression. A titre d'exemple, dans le cadre du projet de numérisation des œuvres de Michel Ange [70], la statue du "David" a été scannée à l'aide de deux milliards d'échantillons. La représentation non compressée d'un tel modèle nécessite alors plusieurs dizaines de Giga octets.

Toute approche de compression utilise nécessairement les deux étapes rappelées

dans le schéma de la figure 1.3, afin d'obtenir la séquence binaire la plus compacte possible. Les méthodes de compression exploitent le contexte des données à représenter pour réorganiser l'information de manière pertinente et optimale, afin de réduire le nombre de bits nécessaires à sa représentation. Cette réduction de redondance peut passer par une réorganisation des données pour laquelle une reconstruction exacte de l'information est possible. Mais une autre catégorie de méthodes de compression, autorisant une perte contrôlée de l'information, produit des taux de compression beaucoup plus importants, pour un débit cible choisi.



FIG. 1.3 – Principe général de la compression d'un signal quelconque.

Une fois l'information réorganisée en une séquence de symboles, un codage entropique est utilisé afin d'obtenir la séquence de bits la plus compacte possible. Nous reviendrons à la fin de ce chapitre sur les différentes techniques de codage entropique, qui s'appliquent de la même façon pour les deux approches citées.

### 1.3.2 La compression de maillages sans perte

Pour certaines applications professionnelles manipulant des données sensibles comme le calcul par éléments finis ou l'imagerie médicale, la perte d'information ne peut parfois être tolérée pour, par exemple, ne pas risquer de fausser un diagnostic. Ainsi des méthodes de compression sans perte sont utilisées pour réduire la taille de ces données. Dans le cadre de la compression d'images ou de maillages, on remarque que l'intensité ou la position associée à des échantillons voisins est souvent très corrélée. D'autre part, sur les maillages surfaciques, l'information topologique peut être d'autant plus compressée qu'elle est régulière, c'est-à-dire que l'ensemble des sommets possèdent le même nombre de voisins.

Les méthodes de compression sans perte sont les premières à avoir été proposées pour la compression d'objets 3D représentés par des maillages. Celles-ci consistent à réorganiser l'information dans l'espace d'origine du signal qu'elles codent généralement sous forme de bandes de triangles. Il existe également plusieurs extensions de ces méthodes permettant de coder les maillages de façon progressive, ceci facilitant le stockage, le rendu et la transmission de telles données. Les travaux réalisés en compression de maillages sans perte se divisent en deux grandes catégories : les méthodes dites mono-résolution ou progressives. La différence repose essentiellement sur la façon de coder l'information topologique.

#### 1.3.2.1 La compression mono-résolution

Les techniques mono-résolution sont les premières à avoir été proposées pour la compression de maillages surfaciques. Elles utilisent toutes le même principe de parcours linéaire des triangles, qui consiste à commencer par un triangle germe puis à découvrir à chaque étape un nouveau sommet jusqu'à ce que le maillage soit entièrement parcouru. La bande de triangles formée peut ne pas couvrir l'ensemble du maillage (si elle se referme sur elle-même), dans ce cas, on relance le processus en partant d'un nouveau

triangle germe non codé. La découverte d'un nouveau triangle va généralement de pair avec celle d'un nouveau sommet. Un code doit alors être transmis afin de déterminer la façon de rattacher le nouveau sommet au triangle précédemment découvert. Ces méthodes de compression diffèrent les unes des autres par le parcours et le codage de la connectivité qui peut se faire de plusieurs manières. Elles se distinguent également dans leur façon de coder l'information géométrique à partir de l'information topologique, qui exploite le codage prédictif de la position des points par rapport à leur voisinage local.

Le principe du codage prédictif est d'exprimer la position d'un sommet par rapport aux sommets précédemment découverts lors du parcours topologique. Ceci permet d'exploiter la corrélation entre ce sommet et son voisinage, réduisant ainsi l'information transmise. Cette dernière correspond au vecteur différence entre la position prédite par le voisinage et la position réelle du point. Cette technique est parfois référencée sous le nom de "delta-encoding" et le vecteur différence est appelé résidu ou vecteur correctif. On l'exploite également pour le codage des attributs additionnels (couleur, normale, texture ...), qui sont souvent fortement corrélés dans un voisinage local. Le codage différentiel, la prédiction linéaire directe ou par la règle du parallélogramme sont les trois types de prédiction de position les plus utilisés (illustrés à la figure 1.4), mais il existe également des techniques de prédiction non linéaire.

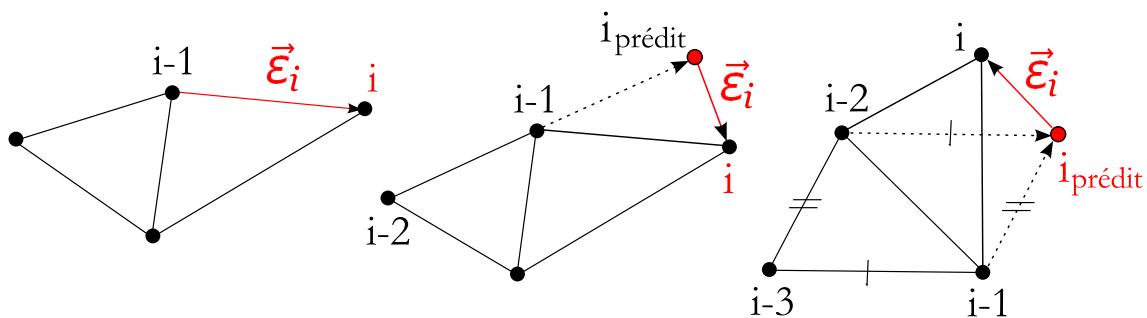


FIG. 1.4 – Principes de la prédiction différentielle (à gauche), linéaire (au milieu) et par la règle du parallélogramme (à droite).  $\vec{\epsilon}_i$  sera alors le vecteur à coder. Image tirée de [90].

### 1.3.2.2 La compression progressive basée sur une simplification séquentielle

Avec l'évolution d'Internet et des applications multimédia, les modèles géométriques peuvent être véhiculés sur des réseaux dont la bande passante constitue un goulet d'étranglement pour le transfert d'informations. Ils peuvent également être visualisés par des terminaux de nature très différente (ordinateur, PDA, téléphone portable dans le futur ...). Il est ainsi nécessaire de produire des méthodes de compression adaptées au matériel ainsi qu'aux besoins de l'utilisateur, c'est le but de la compression progressive. Les méthodes de compression progressive codent les maillages de façon hiérarchique. Elles produisent une version simplifiée (grossière) du maillage ainsi qu'une séquence d'opérations de raffinement permettant de reconstituer le maillage original. La transmission et la visualisation des maillages s'effectuent de façon progressive, l'utilisateur pouvant même décider, s'il le souhaite, de stopper le raffinement à tout moment (compression avec pertes). L'enjeu de ces méthodes est d'optimiser le compromis débit/distorsion pour obtenir à tout moment la meilleure représentation possible quel que

soit le niveau de reconstruction.

Ces méthodes produisent ainsi des approximations intermédiaires du modèle original correspondant à différents niveaux de résolution. Il existe deux catégories de méthodes qui diffèrent par les niveaux de résolution proposés. La première catégorie propose un raffinement continu du maillage où chaque opération de raffinement est codée séparément. Cette méthode s'avère très flexible puisqu'on dispose alors d'un très grand nombre de niveaux de détails. La seconde catégorie fait évoluer le maillage en regroupant les opérations de raffinement en ensembles indépendants, produisant moins de niveaux de détails (une dizaine environ). Cette dernière méthode est beaucoup plus rapide et le code produit plus compact, c'est pourquoi la plupart des travaux l'exploitent. Le taux de compression proposé par ces méthodes est généralement plus élevé comparé aux méthodes mono-résolution. Les lecteurs intéressés par une description détaillée des techniques de compression de maillages sans perte peuvent se reporter à [2].

Mais dans la majorité des cas, on peut obtenir des taux de compression bien meilleurs en s'autorisant quelques pertes qu'il va falloir chercher à minimiser pour que la forme géométrique de l'objet ne soit pas trop altérée. Pour cela, il est commode de changer d'espace pour représenter le signal de façon plus compacte. On cherche généralement à le projeter dans un espace fréquentiel où les informations sont naturellement moins corrélées et où il est possible d'en réduire fortement certaines, voire de les éliminer sans que cela soit trop perceptible. Cette projection est également utilisée pour d'autres traitements tels le débruitage, le filtrage, le lissage ou le tatouage de ces données.

### 1.3.3 La compression avec pertes par transformation

Les méthodes de compression avec pertes s'appuient sur la théorie de l'information pour éliminer la redondance présente dans la représentation naturelle des signaux. Cette redondance se traduit par exemple sur une image numérique par la dépendance existante entre chacun des pixels et ses voisins. En effet, vu la taille d'un pixel, sa luminosité diffère souvent très peu de celle de ses voisins. Plusieurs techniques permettent d'éliminer cette redondance en transformant les pixels initiaux en un ensemble de coefficients moins dépendants les uns des autres.

Ces techniques de compression utilisant une projection du signal dans un espace transformé proposent soit des concepts spécialement adaptés à l'irrégularité sous-jacente de ces données (comme l'analyse spectrale), soit une réorganisation de la topologie de ces objets permettant ainsi d'adapter les techniques utilisées en traitement d'images ou de vidéos, comme la transformée en ondelettes.

#### 1.3.3.1 L'analyse par décomposition spectrale

Le principe des algorithmes de décomposition spectrale est de fournir une extension de l'analyse de Fourier classique pour les maillages surfaciques. C'est dans cette optique que Karni et Gotsman [53] ont proposé de projeter l'information géométrique sur la base constituée des vecteurs propres de la matrice Laplacienne, construite à partir du graphe de connectivité du maillage. Un exemple de ce procédé est illustré sur la figure 1.5. L'information peut alors être représentée par les coefficients géométriques obtenus (coefficients spectraux), qui se révèlent être de plus en plus faibles au fur et à mesure que la fréquence augmente. La décorrélation obtenue est ainsi satisfaisante mais non optimale.



De plus, la construction de la base spectrale ne tient compte que de la connectivité du maillage et nécessite un coût de calcul élevé. Ainsi, Ben-Chen et Gotsman [6] ont par la suite utilisé une transformation différente permettant, pour une classe de maillages de connectivité donnée, d'obtenir cette fois des bases optimales, mais avec des temps de calculs qui restent élevés.

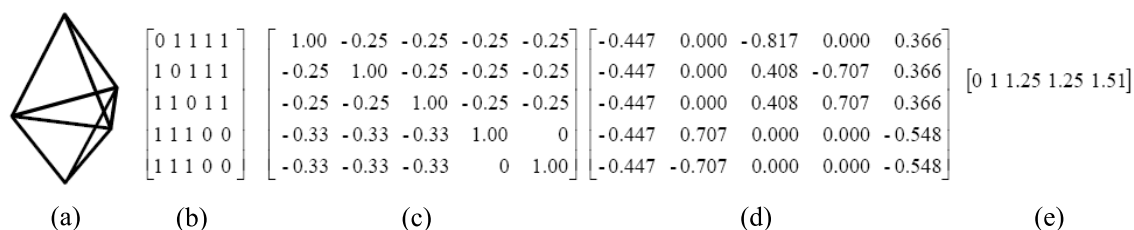


FIG. 1.5 – Analyse spectrale d'un maillage 3D contenant cinq sommets. (a) Maillage 3D. (b) Matrice d'adjacence. (c) Laplacien. (d) Vecteurs propres du Laplacien (en colonne) et (e) valeurs propres associées. Image tirée de [53].

Sorkine *et al.* [112] ont alors envisagé une nouvelle méthode d'approximation de la géométrie par décomposition spectrale. La première amélioration vient du fait que les vecteurs de base ne sont plus calculés sur la connectivité seule. La prise en compte de "points d'ancrage" (anchor vertices) stratégiquement répartis sur la surface améliore ainsi l'information géométrique encapsulée dans les vecteurs de base, ce qui permet d'obtenir des approximations plus fidèles. Enfin, le calcul explicite de la base sous-jacente est évité ce qui permet une réduction du problème de reconstruction qu'il est possible de résoudre par un système linéaire de moindres carrés.

Mais ces méthodes ne proposent qu'une progressivité géométrique, la connectivité restant inchangée au cours de la transmission. C'est pourquoi beaucoup de travaux se sont tournés vers l'analyse multirésolution, alternative permettant de disposer d'une scalabilité à la fois géométrique et topologique.

### 1.3.3.2 L'analyse multirésolution

L'analyse multirésolution produit une décomposition réversible d'un signal en une série d'approximations de celui-ci. L'utilisation d'une transformée en ondelettes permet alors de coder le signal par l'approximation la plus grossière, accompagnée de l'ensemble des détails perdus lors du sous-échantillonnage du signal d'origine, appelés coefficients d'ondelettes. Lors de la reconstruction du signal, un sur-échantillonnage est d'abord réalisé suivi d'une prédiction des nouveaux échantillons à partir du signal grossier, complétée par un ajout des coefficients d'ondelettes. L'ensemble de ces étapes produit alors une reconstruction parfaite du signal sous réserve qu'aucune quantification, ni aucun remaillage n'aient été préalablement appliqués.

Comme nous l'avons déjà mentionné, les applications visées par nos contributions n'imposent pas une reconstruction exacte de l'information. Nous nous sommes ainsi tournés vers l'analyse multirésolution afin d'étendre des travaux existants basés sur la compression de modèles CAO par subdivision inverse (dans le cadre du projet RNRT SEMANTIC-3D [47]). L'ajout d'ondelettes géométriques (appelées également "ondelettes de subdivision") aux surfaces de subdivision permet alors de définir un schéma d'ana-

lyse multirésolution sur un ensemble d'objets plus génériques.

Avant de détailler dans les chapitres suivants, l'ensemble des méthodes de l'état de l'art, ainsi que nos contributions, revenons sur les principes généraux de la transformée en ondelettes et de son extension aux surfaces, afin de bien comprendre comment l'information géométrique est décomposée dans le nouvel espace.

## 1.4 Principes de l'analyse multirésolution

### 1.4.1 Théorie de la transformée en ondelettes

Les premières ondelettes (ondelettes de Haar) sont apparues au début du 20<sup>ème</sup> siècle (1909), afin de proposer une alternative aux analyses de Fourier classiques.

La décomposition d'un signal dans les bases de Fourier consiste à l'exprimer sous forme d'une somme de fonctions sinus et cosinus ou leur expression équivalente sous forme exponentielle. On obtient une décomposition en somme de constituants simples et universels où les fonctions sinusoïdales oscillent indéfiniment dans le temps et ne dépendent que de la fréquence. Les amplitudes associées à chaque fréquence  $\omega$  représentent l'importance des ondes sinusoïdales dans le signal  $s(t)$  et forment une fonction appelée transformée de Fourier du signal  $s(t)$  qui s'écrit :

$$\hat{s}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt$$

Si l'on peut déterminer les composantes fréquentielles de la fonction  $s(t)$ , l'évolution temporelle des différentes fréquences ne peut pas être reflétée par l'analyse de Fourier. Ainsi, il n'est par exemple pas possible de déterminer chacune des notes jouées dans un signal musical.

Pour remédier à cela, Gabor a introduit en 1946 la transformée de Fourier à fenêtre glissante ou Short Time Fourier Transform (STFT). La transformation s'obtient en multipliant le signal  $s(t)$  par une fonction régulière et bien localisée  $g(t)$  (généralement une gaussienne) qui joue alors le rôle de fonction fenêtre que l'on fait "glisser" le long du signal. La transformation s'écrit alors de la façon suivante :

$$STFT[s(t)](\omega, b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)g^*(t-b)e^{-j\omega t} dt$$

où  $f^*(t)$  correspond au complexe conjugué de  $f(t)$ .

On obtient ainsi un ensemble de plages (centrées autour du paramètre  $b$  de localisation en temps) qui sont étudiées séparément par une analyse traditionnelle de Fourier. Mais l'un des principaux inconvénients est que la longueur des plages est fixée une fois pour toutes. Le plan temps-fréquence est ainsi découpé en atomes d'analyse constants, ceci ne permet pas une analyse des fréquences à différents niveaux de résolution.

#### 1.4.1.1 Transformée en ondelettes continue

C'est pour proposer ce type d'analyse que les ondelettes ont été introduites. Les

formulations exposées dans la suite de cette partie ont été tirées de la thèse de Martinet [83]. La transformation en ondelettes de la même fonction  $s(t)$  se note alors :

$$WT[s(t)](a, b) = \langle \psi_b^a, s \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, a \in \mathbb{R}^{*+}, b \in \mathbb{R}.$$

où  $\langle f, g \rangle$  est le produit scalaire entre les fonctions  $f$  et  $g$  défini par :

$$\langle f, g \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f^*(t)g(t)dt$$

L'ensemble des fonctions  $\psi_b^a$ , correspondant aux vibrations les plus courtes et élémentaires possibles, forme une famille d'ondelettes engendrée par translation en temps (paramètre  $b$ ) et dilatation (paramètre  $a$ ) d'une ondelette mère analysante  $\psi(t)$ . Durant un temps d'autant plus court que  $a$  est petit, l'ondelette oscille alors à une fréquence  $1/a$ .

Lors de la décomposition d'un signal quelconque, les coefficients affectés à chaque fonction élémentaire  $\psi_b^a$  donnent alors une information directe sur les propriétés temporelles et fréquentielles du signal. On remarque sur la figure 1.6 que cette transformation s'adapte aux fréquences étudiées car la largeur temporelle de la fonction  $\psi(t)$  dépend du paramètre d'échelle  $a$ .

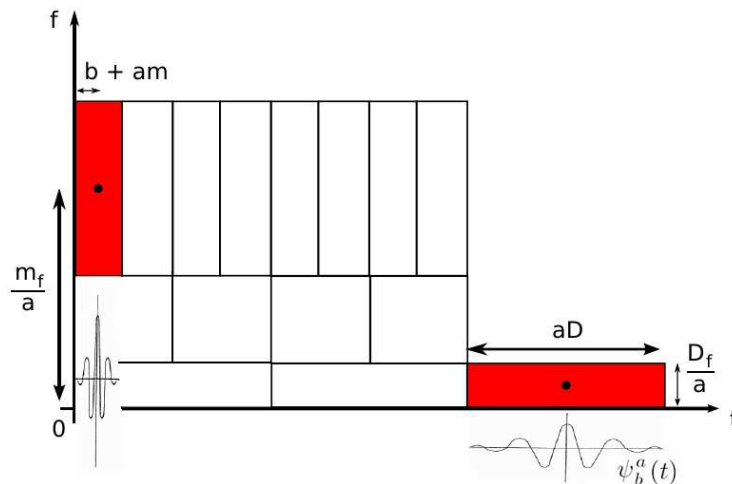


FIG. 1.6 – Illustration du pavage du plan temps-fréquence après une décomposition en ondelettes. Les paramètres  $m$  et  $D$  représentent respectivement le centre et la largeur de la fonction  $\psi$ ;  $m_f$  et  $D_f$  le centre et la largeur du spectre de cette même fonction.

Pour parler d'analyse en ondelettes, il faut en plus de cela que l'ondelette soit admissible, c'est-à-dire que la transformation soit inversible, afin que la reconstruction du signal soit possible. Cette condition d'admissibilité revient à dire que la fonction doit être de moyenne nulle.

#### 1.4.1.2 Transformée en ondelettes discrète

Dans le cadre de l'analyse de signaux discrets, les paramètres de translation en temps ( $b$ ) et dilatation ( $a$ ), utilisés pour la construction d'une transformation en ondelettes, sont

restreints à des valeurs discrètes en posant :

$$\left. \begin{array}{l} a = a_0^m, a_0 > 1 \\ b = n b_0 a_0^m, b_0 > 0 \end{array} \right\} m, n \in \mathbb{Z}$$

La transformée en ondelettes discrète de  $s(t)$  se réécrit alors de la façon suivante :

$$WT[s(t)](m, n) = \langle \psi_n^m, s \rangle = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi^*(a_0^{-m}t - nb_0) dt.$$

Le choix de  $a_0$  et  $b_0$  produit alors un découpage du plan temps-fréquence qui peut être agencé de plusieurs façons différentes en fonction de la famille de fonctions analysantes choisies, qui peuvent engendrer :

- une transformation en ondelettes redondante appelée trame (ou frame). Les fonctions analysantes  $\psi_b^a(t)$  ne sont alors pas linéairement indépendantes et vérifient la formule suivante s'il existe deux bornes  $A$  et  $B$  positives :

$$A \|s\|^2 \leq \sum_{m,n} |\langle \psi_n^m, s \rangle|^2 \leq B \|s\|^2$$

Les trames sont utilisées pour réaliser une analyse redondante, permettant par exemple de corriger les erreurs ou pertes si le canal utilisé pour la transmission du signal est peu fiable ou bruité.

- une transformation en ondelettes non redondante qui est généralement utilisée pour la compression de signaux. La famille d'ondelettes est alors qualifiée de base, qui peut être :
  - une base orthogonale, où chaque ondelette est orthogonale à toutes les autres. Celle-ci permet d'obtenir une décomposition unique en ondelettes indépendantes. On cherche souvent à obtenir une base orthonormale qui est un cas particulier des trames pour lesquelles les bornes sont toutes deux égales à 1.
  - une base oblique ou biorthogonale, qui est très utilisée en pratique car il est souvent impossible de construire des ondelettes qui sont simultanément orthogonales entre elles, à support local et symétriques. Ces dernières propriétés sont pourtant importantes, notamment pour la compression. Il est ainsi parfois pratique de relaxer la condition d'orthogonalité totale, en ne conservant que l'orthogonalité entre les ondelettes de niveaux de résolution différents, afin que leur support soit plus compact pour une décomposition plus rapide. Enfin, la forme la plus restrictive, introduite par Cohen *et al.* [17] définit la possibilité d'éliminer complètement l'orthogonalité. Les espaces de fonctions d'ondelettes ne sont alors pas les compléments orthogonaux des espaces de fonctions d'échelles, mais simplement compléments. Pour former cette base, il suffit en général de partir d'une famille linéairement indépendante  $\{\dots, e_i(t), \dots\}$  et de construire une famille duale  $\{\dots, \hat{e}_i(t), \dots\}$  vérifiant :

$$\langle e_i(t), \hat{e}_j(t) \rangle = \delta_{ij}$$

avec  $\delta_{ij}$  le symbole de Kronecker définit par

$$\begin{cases} \delta_{ij} = 1, \text{ si } i = j; \\ \delta_{ij} = 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

Pour définir une analyse discrète, il reste à déterminer les valeurs de  $a_0$  et  $b_0$ . La technique la plus utilisée actuellement est l'analyse dyadique, introduite par Mallat en 1989 [80], où  $a_0 = 2$  et  $b_0 = 1$ . Mais il existe également des transformées en ondelettes rationnelles, où  $a_0$  est défini par un nombre rationnel. Ces dernières sont principalement utilisées pour le débruitage de signaux.

### 1.4.2 Théorie de l'analyse multirésolution dyadique

L'introduction de l'analyse dyadique a permis d'obtenir une application concrète des ondelettes, par l'introduction d'une relation liant les fonctions ondelettes et les bancs de filtres. Les paramètres  $a$  et  $b$  utilisés pour le pavage disjoint du plan temps-fréquence sont alors définis de la façon suivante :  $a = 2^i$  et  $b = j2^i$ , où  $i$  représente le facteur d'échelle et  $j$  est un multiple entier.

L'analyse multirésolution discrète, définie pour les fonctions d'énergie finie (formant l'espace  $L^2(\mathbb{R})$ ), est alors décrite formellement par la donnée d'une suite de sous-espaces imbriqués  $(V^m)_{m \in \mathbb{Z}} \subset L^2(\mathbb{R})$ . Ces sous-espaces sont considérés comme approximation multirésolution de  $L^2(\mathbb{R})$ , s'ils respectent les propriétés suivantes tirées de [81] :

1.  $\forall (m, n) \in \mathbb{Z}^2, f(x) \in V^m \Leftrightarrow f(x - n) \in V^m$ ,
2.  $\forall m \in \mathbb{Z}, V^{m+1} \subset V^m$ ,
3.  $\forall m \in \mathbb{Z}, f(x) \in V^m \Leftrightarrow f(2^m x) \in V^0$ ,
4.  $\lim_{m \rightarrow +\infty} V^m = \bigcap_{m=-\infty}^{+\infty} V^m = \{0\}$ ,
5.  $\lim_{m \rightarrow -\infty} V^m = \bigcup_{m=-\infty}^{+\infty} V^m$  est dense dans  $L^2(\mathbb{R})$ ,
6. Il existe une fonction  $\varphi \in V^0$  telle que la suite  $\varphi(x - n), n \in \mathbb{Z}$  soit une base de Riesz de  $V^0$ .

De la propriété 6, on peut déduire qu'il existe une famille de fonctions  $\{\varphi_n^{m=0}; n \in \mathbb{Z}\}$  formant une base orthonormée de  $V^0$ , définies par  $\varphi_n^m(t) = 2^{-m/2} \varphi(2^m t - n)$ . On démontre ensuite, à l'aide la propriété 3, que l'ensemble des fonctions  $\{\varphi_n^m; n \in \mathbb{Z}\}$ , appelées fonctions d'échelle, forme une base orthonormée de  $V^m, \forall m \in \mathbb{Z}$ . La projection du signal dans cette base orthonormée de  $V^m$ , définie en dilatant et translatant une unique fonction d'échelle  $\varphi(t)$ , produit alors une approximation du signal. Mais le problème est que ces fonctions ne sont pas des ondelettes admissibles.

C'est pourquoi, Mallat a alors cherché d'autres sous-espaces vectoriels permettant d'assurer une reconstruction parfaite. En considérant les espaces  $W^m$ , compléments orthonormés de  $V^m$  dans  $V^{m-1}$ , les fonctions ondelettes définies comme bases orthonormées de ces espaces  $W^m$  sont cette fois-ci admissibles. Le sous-espace  $V^m, \forall m < M$  se réécrit alors sous la forme :

$$V^m = V^M \bigoplus_{k=0}^{M-m-1} W^{M-k}$$

où l'opérateur  $\bigoplus$  désigne la somme directe orthogonale de sous-espaces vectoriels.

Ces derniers espaces  $W^m$  sont orthogonaux 2 à 2 par construction et décrivent complètement  $L^2(\mathbb{R})$ . De part les propriétés précédemment décrites, on en déduit qu'il est possible de trouver une base orthonormée de  $L^2(\mathbb{R})$  formée des fonctions d'échelle  $\varphi_n^m$  de

résolution  $m$  (base de  $V^m$ ) et des fonctions ondelettes  $\psi_n^m$  correspondantes. On peut ainsi représenter un signal par une approximation grossière et une suite de détails.

Pour effectuer les changements de base nécessaires à l'expression multirésolution du signal, on définit pour chaque échelle des filtres d'analyse où l'approximation du signal  $s(t)$  est interprétée comme un filtrage passe-bas suivi d'un sous-échantillonnage uniforme correspondant à une suppression des hautes fréquences de  $s(t)$ . Les figures 1.7, 1.8 et 1.9 illustrent ce procédé ainsi que les propriétés des sous-espaces, pour un signal monodimensionnel. Les détails sont alors obtenus de la même façon en appliquant cette fois-ci un filtre passe-haut.

Dans le cadre des images, la transformée en ondelettes est appliquée en deux temps : d'abord sur les lignes, puis sur les colonnes. L'algorithme qui en découle est une combinaison de filtrages et de sous ou sur-échantillonnages 1D. L'extension de ce principe aux maillages surfaciques ne consiste pas cette fois-ci à ajouter une dimension par rapport au traitement d'images, puisque ce sont des variétés de dimension 2, plongées dans l'espace tridimensionnel.

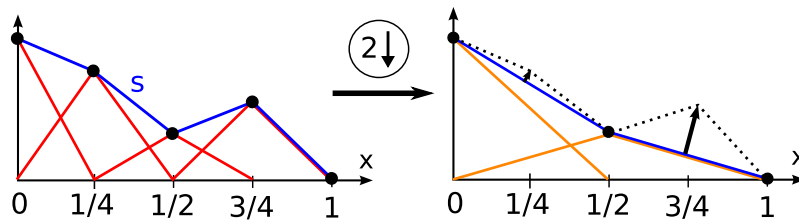


FIG. 1.7 – Filtrage d'un signal, suivi d'un sous-échantillonnage par 2. Les fonctions triangulaires en rouge symbolisent la projection du signal sur les fonctions d'échelles, celles en pointillés sur les fonctions ondelettes. Les flèches noires représentent les détails perdus lors du passage d'une résolution à l'autre (coefficients d'ondelettes).

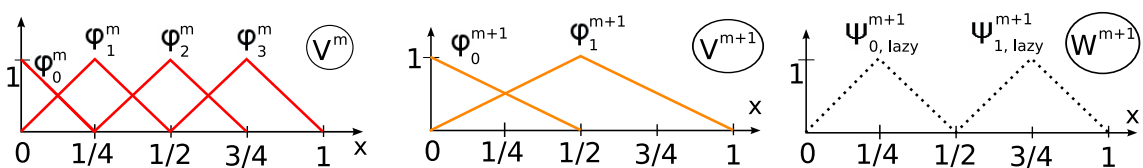


FIG. 1.8 – Base des fonctions d'échelle (en rouge : résolution la plus fine, en orange : la plus grossière) et d'ondelettes (en pointillés), pour la décomposition du signal de la figure 1.7.

## 1.5 L'analyse multirésolution pour les maillages surfaciques

L'adaptation de l'analyse multirésolution pour les maillages surfaciques triangulaires peut toujours s'exprimer à l'aide de deux filtres appliqués en cascade. Ainsi, durant la phase d'analyse, des filtres passe-bas (lettre  $L$  sur la figure 1.10) et passe-haut (lettre  $H$  sur la figure 1.10) sont appliqués sur le maillage initial produisant respectivement un maillage grossier et un ensemble de détails haute-fréquence sous-forme de vecteurs tridimensionnels.

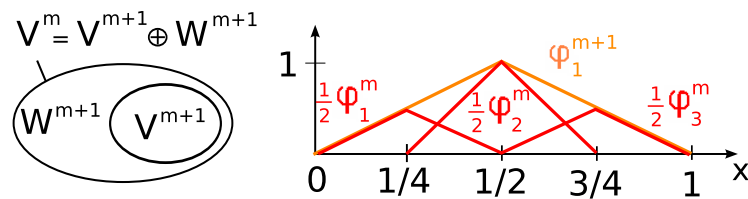


FIG. 1.9 – Construction des espaces de fonctions d'échelle, à partir de la résolution inférieure. A gauche : schématisation de l'imbrication des espaces de fonctions d'échelles et d'ondelettes. A droite : illustration de la construction des espaces de fonctions d'échelle, où chaque fonction  $\varphi_n^{m+1}$  de résolution  $m + 1$  est une combinaison des fonctions d'échelle de la résolution immédiatement inférieure ( $m$ ).

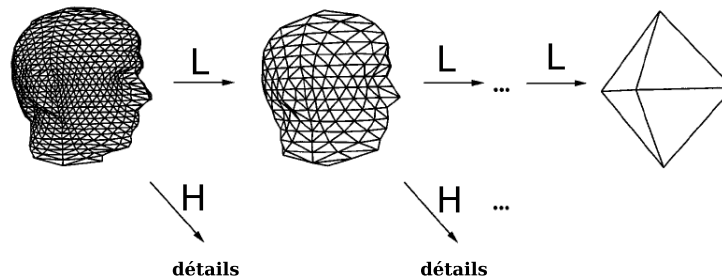


FIG. 1.10 – Décomposition en ondelettes d'un maillage surfacique triangulaire. Analogie avec la transformation en ondelettes d'un signal 1D, où un filtre passe-bas (L) produit une approximation du signal, tandis qu'un filtre passe-haut recueille les détails perdus : les ondelettes.

C'est grâce aux travaux de Lounsbery *et al.* [75], qui ont montré qu'un schéma de subdivision pouvait définir une base de fonctions d'échelle, que l'analyse multirésolution a pu être étendue aux maillages. Les filtres de subdivision peuvent alors être formalisés sous forme de matrices de subdivision utilisées pour la synthèse ; les matrices inverses définissant les filtres d'analyse. Mais il existe une autre technique appelée "lifting scheme" qui décompose ces filtres sous forme de matrices très simples, permettant de déduire la phase d'analyse de la synthèse par simple inversion du signe et de l'ordre de ces matrices.

### 1.5.1 Généralités sur les surfaces de subdivision

Une surface de subdivision est une surface lisse, définie comme la limite d'une séquence de raffinements, appliquée sur un maillage de contrôle. Ces raffinements affectent à la fois la connectivité et la géométrie du maillage. Ils consistent d'une part à ajouter de nouveaux sommets ou facettes au polyèdre courant (transformation topologique) et d'autre part à déplacer les sommets par l'application d'un filtre de voisinage (transformation géométrique). Les sommets sont généralement ajoutés par quadrisection canonique, au milieu des arêtes de chaque facette triangulaire ou quadrangulaire.

Le maillage ainsi créé tend vers une surface limite aussi lisse que celles obtenues en utilisant une paramétrisation polynomiale (de continuité  $C^n$ ) du type des surfaces B-Splines ou des NURBS [76], tout en utilisant un mécanisme simple et efficace. L'avantage est que les problèmes de recollage de patches, dans le cas d'une modélisation d'objets de topologie arbitraire par des NURBS, sont ici évités.



Elles permettent de plus de bénéficier facilement d'une représentation hiérarchique des scènes et/ou objets, comme le montre le schéma 1.11 ci-dessous, facilitant leur indexation. En effet, les maillages de contrôle successifs définissent un modèle progressif de la surface 3D limite. Enfin, elles offrent un gain en terme de codage par rapport à l'utilisation de maillages polygonaux, car il suffit d'un nombre fini de points de contrôle pour définir des surfaces limites lisses. En effet, grâce à leur aspect structuré, le codage d'une grande partie de la connectivité devient alors implicite.

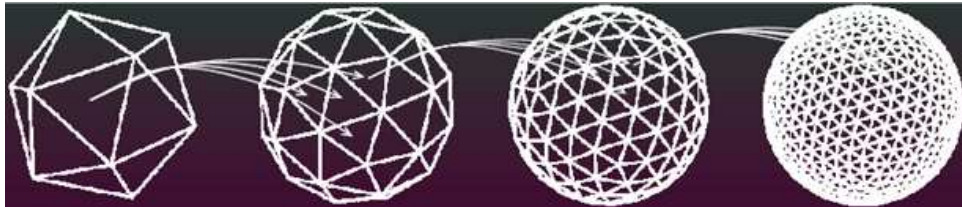


FIG. 1.11 – Illustration de l'aspect hiérarchique de la subdivision canonique de facettes.

Les surfaces de subdivision possèdent également de bonnes propriétés concernant la qualité de la visualisation finale et un fort potentiel au niveau de la compression des modèles CAO, exploité par Lavoué [62], dans le cadre du projet RNRT SEMANTIC-3D [47]. Nous avons donc cherché à étendre l'algorithme proposé afin de développer une méthode générique s'appliquant à n'importe quel objet 3D et s'adaptant à la demande de l'utilisateur.

Il existe plusieurs schémas de subdivision qui se différencient par le type de polygones traités et le type d'opération de subdivision réalisée, qui peut être de nature approximante ou interpolante. Dans le cas d'une approximation, les points de contrôle ne se situent pas sur la surface limite, la surface résultante est donc plus difficile à estimer. Au contraire, après application d'un schéma interpolant, tous les points de contrôle appartiennent à la surface limite, puisque seuls les sommets nouvellement insérés à chaque étape sont déplacés.

Plusieurs de ces schémas sont spécifiés dans la partie AFX (Animation Framework eXtension) de la norme MPEG-4 [87, 85], pour obtenir à la fois des surfaces lisses par simple subdivision de maillages mais aussi certaines surfaces plus complexes. Ces dernières sont obtenues grâce à un ajout de détails à la position des nouveaux sommets apparus après chaque pas de subdivision. L'utilisation des coefficients d'ondelettes permet alors de coder ces détails qui n'ont pas pu être reflétés par la subdivision seule. Ce principe est très utilisé pour le codage de surfaces naturelles ou permet par exemple une navigation virtuelle, locale et adaptative dans de larges scènes à partir d'une représentation maillée d'un terrain [35].

La subdivision linéaire, ou schéma midpoint est le filtre interpolant le plus simple. Il consiste à effectuer une quadrisection de facettes, comme le montre le schéma de gauche de la figure 1.12, ce qui ne définit pas une surface résultante lisse. Ce schéma définit plus précisément le "stencil" pour ce filtre, où les chiffres indiquent la contribution du voisinage dans la combinaison linéaire permettant la prédiction des nouveaux sommets.



Ainsi, pour la compression de surfaces lisses, il est plus avantageux d'utiliser le schéma approximant de Loop [72] (représenté sur la figure 1.13) ou le schéma interpolant Butterfly [24] (schéma de droite de la figure 1.12). Ils est ainsi possible d'obtenir de plus petits coefficients d'ondelettes pour de meilleurs taux de compression, puisqu'un plus large voisinage est considéré lors de la prédiction. De plus, il est important que la décomposition et la reconstruction se fassent en temps linéaire, c'est pourquoi les schémas retenus sont locaux : la position de  $n$ 'importe quel sommet du maillage  $M^{n+1}$  dépend de celle d'un petit nombre de sommets du maillage de résolution inférieure  $M^n$ , ne nécessitant que la résolution d'un petit système linéaire autour du sommet.

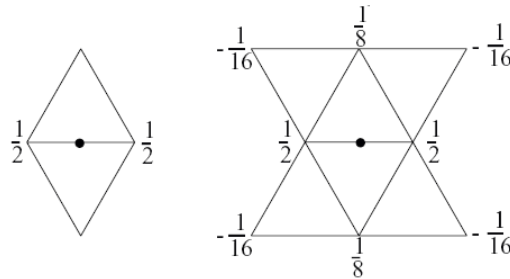


FIG. 1.12 – Masques de subdivision linéaire, appelés également midpoint (à gauche) et Butterfly (à droite) dans le cas régulier. Schéma tiré de CNM [56].

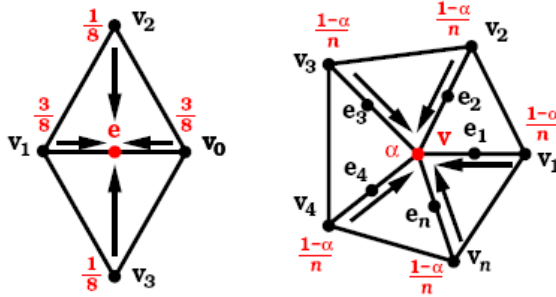


FIG. 1.13 – Schéma de subdivision de Loop [72]. A gauche : déplacement des sommets impairs (nouveaux sommets ajoutés à chaque étape de subdivision). A droite : déplacement des sommets pairs, avec  $\alpha(n) = \frac{3}{8} + (\frac{3}{8} + \frac{1}{4} \cos \frac{2\pi}{n})^2$ . Schéma tiré de [7].

Le schéma Butterfly est l'un des plus utilisés pour l'analyse multirésolution de maillages, car il génère sur les triangulations régulières des surfaces limites  $C^1$  et c'est le schéma interpolant ayant le masque de plus petit support. Mais le principal inconvénient de ce schéma est qu'il produit des artéfacts indésirables sur des topologies irrégulières. En effet, les surfaces obtenues après plusieurs étapes de subdivision ne se révèlent pas totalement lisses, comme le montre le maillage de gauche de la figure 1.14), ce qui n'est pas satisfaisant pour un grand nombre d'applications.

C'est pour tenter d'éliminer ces artéfacts que Zorin *et al.* [129] ont proposé une amélioration du schéma de Dyn *et al.* [24]. Ils ont ainsi défini de nouveaux masques pour les sommets irréguliers, tout en conservant la simplicité et le comportement du schéma originel. Les pondérations de ces masques, qui prennent en compte l'ensemble des voi-

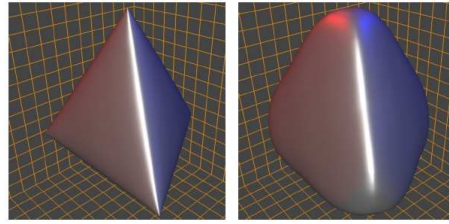


FIG. 1.14 – Subdivision d'un tétraèdre basée sur le masque de Butterfly de Dyn *et al.* [24] (à gauche) et l'amélioration de Zorin *et al.* [129] (à droite). Image tirée de [129].

sins de chaque sommet irrégulier, ont été calculées à l'aide d'une transformée de Fourier discrète ainsi qu'une analyse en composantes principales. Le schéma de subdivision proposé, contrairement aux schémas interpolants classiques, donne des résultats comparables aux surfaces obtenues par des techniques approximantes en très peu d'itérations. La figure 1.15 compare l'allure des fonctions d'échelle obtenues pour un sommet de valence 3, lors de l'utilisation du schéma Butterfly classique et de l'extension de Zorin *et al.* [129].

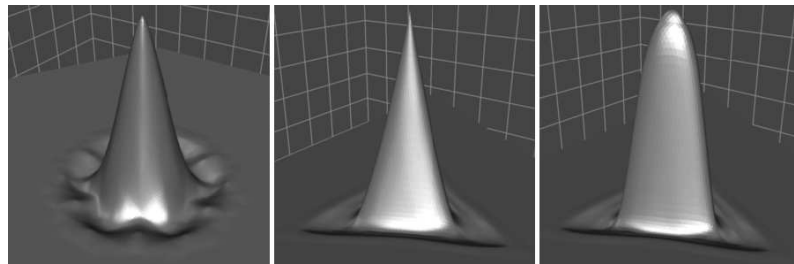


FIG. 1.15 – Les figures de gauche et du milieu présentent l'allure de la fonction d'échelle associée au masque Butterfly, appliqué respectivement sur un sommet régulier et un sommet de valence 3. Pour la figure de droite, la fonction d'échelle correspond à l'extension de Zorin *et al.* [129], appliquée sur un sommet de valence 3.

A noter que ces différents schémas possèdent tous des filtres spéciaux pour le traitement des maillages ouverts (appelés aussi maillages à bords). La prédiction des sommets situés sur les bords est alors basée sur un filtre simplifié dont ceux utilisés pour la subdivision de Loop et de Butterfly sont présentés à la figure 1.16. Les sommets ajoutés par quadrisection canonique au niveau des bords auront alors toujours une connectivité égale à quatre, sur les maillages manifolds.

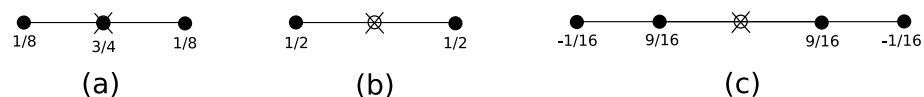


FIG. 1.16 – Masques utilisés dans la subdivision de Loop (a, b) et Butterfly (c) au niveau des bords pour les maillages ouverts. Les sommets blancs appartiennent à la résolution immédiatement plus fine que celle des noirs.

Nous venons de définir le procédé permettant d'obtenir l'ensemble des approxi-

mations multirésolution, correspondant à l'application d'un filtre passe-bas, suivi d'un sous-échantillonnage. Une première méthode permettant d'obtenir le filtre passe-haut correspondant consiste à construire le filtre miroir en quadrature du filtre passe-bas. Mais pour éviter d'avoir à inverser ces matrices pour la phase d'analyse, un procédé appelé "lifting scheme" permet d'accélérer les calculs et offre également plusieurs autres avantages, présentés ci-après.

### 1.5.2 Les ondelettes de seconde génération

Nous venons de voir que pour chaque niveau de résolution le maillage grossier et les détails sont obtenus respectivement par projection sur une base de fonctions d'échelles et d'ondelettes. En pratique, il est intéressant d'utiliser des ondelettes possédant au moins un moment nul, c'est-à-dire ayant une transformée de Fourier au moins une fois différentiable. Le nombre de moments nuls joue en fait un rôle dans le processus de décroissance des coefficients d'ondelettes à travers les résolutions et permet une stabilité et de bonnes propriétés d'approximation de la transformation. Enfin, le maillage reconstruit par synthèse est considéré comme la meilleure approximation du modèle original au sens des moindres carrés si les fonctions d'échelles sont toutes orthogonales aux fonctions d'ondelettes. Or il n'est pas toujours facile de construire des outils d'analyse par bancs de filtres répondant à toutes ces propriétés. C'est pourquoi les ondelettes de seconde génération, basées sur des arguments purement spatiaux, ont été introduites par Sweldens [115, 116].

Le procédé de construction de ces ondelettes (appelé lifting) permet, en partant d'une base d'ondelettes biorthogonales, d'élever (lifter) l'ordre de celles-ci par l'application de plusieurs étapes de lifting. Ces étapes correspondent à la factorisation de la paire de filtres complexes en un ensemble de filtres simplifiés. Grâce à cette construction, les phases de filtrage et de sous-échantillonnage sont alors inversées, comme le montre la figure 1.17, ce qui limite ainsi le nombre d'opérations à effectuer et l'allocation mémoire. Enfin l'étape d'analyse est simplement obtenue par inversion des signes et de l'ordre des filtres de synthèse.

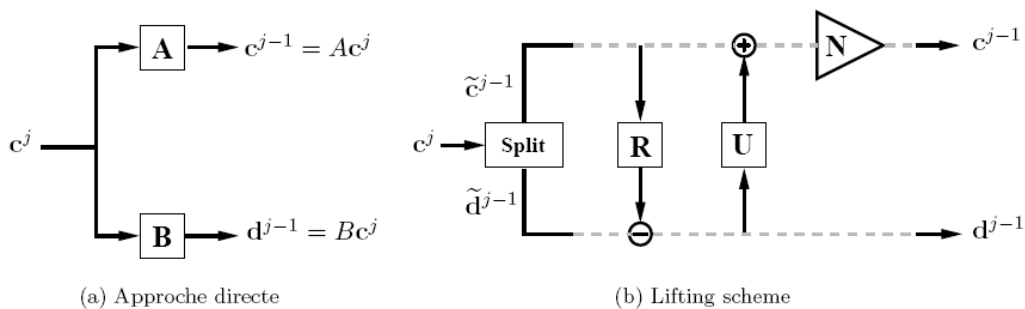


FIG. 1.17 – Comparaison entre l'approche par bancs de filtres (a) et le lifting scheme (b). Schéma tiré de [105]

La première étape ("Split" sur la figure 1.17) consiste à séparer les échantillons  $c^j$  du signal en échantillons pairs ( $\hat{c}^{j-1}$ ) et impairs ( $\hat{d}^{j-1}$ ). Les ondelettes résultantes sont qualifiées d'ondelettes paresseuses (lazy) et correspondent aux fonctions d'échelle de la résolution immédiatement supérieure. Ces ondelettes sont alors biorthogonales, c'est-à-dire qu'elles sont orthogonales entre elles mais pas aux fonctions d'échelles. Les étapes

de lifting vont ainsi avoir pour but de "lifter" ces ondelettes pour qu'elles respectent les propriétés citées précédemment.

La prédiction (étape "R" sur la figure 1.17) consiste à utiliser les échantillons de rang pair ( $\hat{c}^{j-1}$ ) pour prédire les échantillons de rang impair ( $\hat{d}^{j-1}$ ). Les coefficients d'ondelettes sont alors modifiés de manière à coder l'écart à cette prédiction, qui peut s'appuyer sur l'un des schémas de subdivision vus précédemment. Ceci permet alors d'approximer au mieux la forme originale et d'obtenir les coefficients les plus faibles possible. La prédiction est également appliquée dualement en partant des coefficients impairs lorsque le schéma de subdivision utilisé est approximant.

La mise à jour (étape "U" sur la figure 1.17) permet enfin de conserver sur le signal sous-échantillonné la valeur moyenne de la version plus fine. Pour cela, les échantillons pairs sont modifiés par soustraction d'une combinaison linéaire des détails précédemment calculés. Ceci correspond à l'ajout de propriétés à la décomposition résultante. En effet, il est souvent intéressant que les ondelettes utilisées possèdent plusieurs moments nuls ou d'améliorer leur orthogonalité avec les fonctions d'échelles, ce qui, en général permet d'améliorer les performances en terme de codage.

Pour finir, une dernière étape de mise à l'échelle (étape "N" sur la figure 1.17, appelée aussi normalisation ou gain) consiste à multiplier les coefficients pairs et impairs par une valeur non nulle. Ceci correspond à l'ajustement de l'échelle entre les coefficients pairs et impairs. Ainsi les détails d'un niveau  $j$  sont généralement divisés par  $2j$  afin de compenser le fait que les masques de subdivision sont normalisés pour pouvoir s'appliquer avec les mêmes valeurs sur l'ensemble des niveaux de résolution. Mais comme la taille réelle du support de ces masques rétrécit entre chaque niveau d'un facteur 4, ce gain est nécessaire, notamment pour la compression, afin que la surface soit décomposée sur une base normalisée.

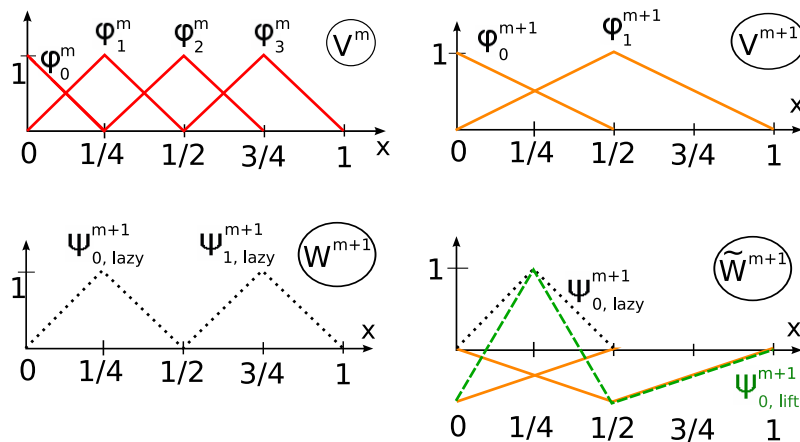


FIG. 1.18 – Schématisation des ondelettes lazy (en bas à gauche) obtenues après sous-échantillonnage du signal de la figure 1.7. Le schéma en bas à droite illustre la manière de "lifter" ces ondelettes par combinaison linéaire, obtenues formellement par l'expression :  $\psi_{0,lift}^m(x) = \psi_{0,lazy}^m(x) - \sum_{k=0}^n \alpha_{k,0}^{m+1} \varphi_{0+k}^m(x)$ .

Pour pouvoir traiter les maillages surfaciques par ondelettes, on les considère alors non plus comme des objets géométriques mais comme des fonctions via une paramé-

trisation de ces surfaces. Cette paramétrisation doit alors tenir compte du fait que l'extension de l'analyse multirésolution introduite par Lounsbery *et al.* [75] ne fonctionne que sur des maillages possédant une topologie particulière. Exhiber une telle paramétrisation revient à se donner un remaillage approchant le maillage initial mais avec une topologie fixée par le contexte des ondelettes.

Une fois cette paramétrisation déterminée, elle est alors utilisée par la phase de remaillage afin de construire généralement un maillage semi-régulier approchant l'objet initial et possédant une topologie propice à l'application d'une décomposition en ondelettes. De ce remaillage dépendent les résultats en fidélité géométrique et donc en nombre de raffinements à effectuer. Les travaux en analyse multirésolution utilisant cette phase de remaillage se différencient par la façon de construire le maillage semi-régulier et donc la paramétrisation sous-jacente. Mais il existe également d'autres méthodes permettant l'application d'une transformée en ondelettes en utilisant une paramétrisation planaire ou sans aucun remaillage préalable.

Intéressons-nous maintenant au codage de ces coefficients, qui passe par une réduction de la corrélation inter ou intra résolution persistant après transformation, suivie d'un codage entropique.

## 1.6 Principe de la décorrélation hiérarchique et contextuelle

Une fois les coefficients d'ondelettes obtenus par analyse multirésolution, produisant une première décorrélation de l'information, il existe encore des dépendances entre les coefficients des différents niveaux de résolution. De plus, à l'intérieur d'un même niveau, les ondelettes peuvent être réduites en tirant parti de leur voisinage. Plusieurs méthodes, présentées dans cette section, ont été construites afin de réduire cette redondance à différentes étapes de la chaîne de compression.

### 1.6.1 Décorrélation appliquée aux images

Les travaux portant sur ce type de traitements ont d'abord été orientés pour la compression d'images, puis étendus aux maillages surfaciques. Nous présentons leur principe en 2D puis détaillons ensuite les adaptations nécessaires à leur extension dans le domaine tridimensionnel.

#### 1.6.1.1 Arrangement des coefficients par codage zerotree

Le codeur EZW (Embedded Zerotree Wavelet) de Shapiro [107], constitue la méthode pionnière d'exploitation de la descendance hiérarchique des coefficients d'ondelettes obtenus sur des images par transformation. Ce traitement est réalisé juste après la transformation du signal et suivi d'une quantification des coefficients et du codage entropique, comme le précise le schéma de la figure 1.19.

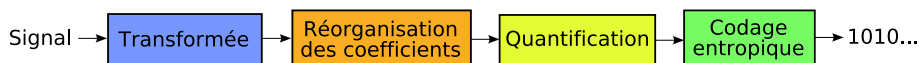


FIG. 1.19 – Grandes étapes du codage zerotree, après transformation du signal.

A partir de la représentation multirésolution de l'image, une filiation entre coefficients de même localisation spatiale et de même orientation, mais de niveau de résolution différent est définie. Cette notion de filiation est illustrée par l'image de gauche de la figure 1.20. La dépendance ainsi établie entre les coefficients des différentes sous-bandes fréquentielles permet alors d'aboutir à la notion "d'arbres de zéros" ou "zerotrees", où chaque coefficient d'ondelette (à l'exception de ceux de la sous-bande de plus basse fréquence) est parent de quatre fils appartenant à la sous-bande de même orientation et de résolution juste supérieure. En ce qui concerne la sous-bande de plus basse fréquence, chaque racine d'arbre admet exactement trois fils, chacun relié à l'une des trois sous-bandes de détails associées.

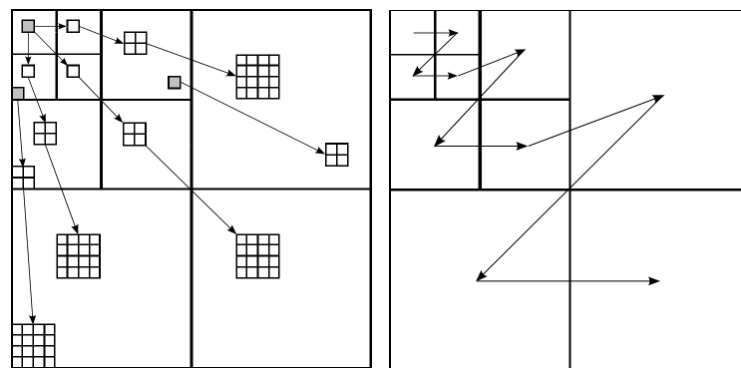


FIG. 1.20 – Exemple d'arbres de zéros définis sur la transformée en ondelettes d'une image. Les racines des trois arbres sont grisées.

Le parcours de l'image (symbolisé par la partie droite de la figure 1.20) est alors défini de telle sorte qu'aucun fils ne soit pris en compte avant son père, afin d'envoyer en priorité les coefficients de plus forte amplitude. De plus, les bits de poids forts des coefficients de plus grande amplitude sont envoyés en premier. Ceci garantit qu'à tout moment de la décompression, ou à n'importe quel débit, la reconstruction partielle produite est la meilleure possible et qu'il est toujours possible de la raffiner progressivement en terme de qualité de reconstruction et de résolution. La puissance du codage par "zero-tree" repose alors sur l'observation que lorsqu'une image est transformée par ondelettes, l'énergie dans les sous-bandes décroît au fur et à mesure que la résolution augmente.

Enfin, Said et Pearlman [102] ont plus récemment développé une alternative à EZW, proposant une implémentation différente pour de meilleures performances. Cette méthode appelée *SPIHT* (Set Partitioning In Hierarchical Trees) diffère principalement dans l'algorithme de tri utilisé pour l'ordonnancement des coefficients.

#### 1.6.1.2 Arrangement des coefficients par codage contextuel

Un codage progressif des coefficients est également proposé par un autre type de codeur, appelé EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation) [120], intégré dans la norme JPEG2000 [27]. Celui-ci considère un codage probabiliste basé sur le voisinage de chaque bit.

Les index de quantification obtenus après transformation sont ainsi codés grâce à un

codeur entropique adaptatif avec modélisation contextuelle. Le schéma de la figure 1.21 réprécise la chaîne complète de compression dans ce cas précis. Les coefficients quantifiés sont préalablement groupés dans chaque sous-bande, en blocs rectangulaires (code blocks), puis chaque code block est codé plan de bit par plan de bit en commençant par les bits de poids le plus fort. Enfin, pour chaque plan de bit, les bits sont codés en trois groupes, en fonction de leur voisinage, puis en trois passes successives.

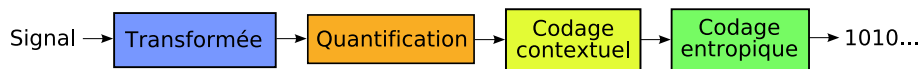


FIG. 1.21 – Grandes étapes du codage contextuel utilisé par JPEG2000, après transformation du signal.

Cette variante, plus efficace que *SPIHT*, propose également un décodage partiel en terme de sous-bandes et de plans de bits, mais c'est un codage propriétaire.

### 1.6.2 Principe de l'extension aux maillages

L'adaptation du codage zerotree aux maillages surfaciques semi-réguliers, considère un ajustement des arbres de zéros à la topologie de ceux-ci. Une arête grossière est ainsi parente de quatre arêtes de même orientation dans le maillage immédiatement plus fin, comme illustré à la figure 1.22. Ce nouveau concept de filiation constitue la seule grande différence par rapport à la méthode 2D. Il a été introduit par Khodakovsky *et al.* [58], et est également basé sur la distribution des coefficients dans la hiérarchie complète d'analyse.

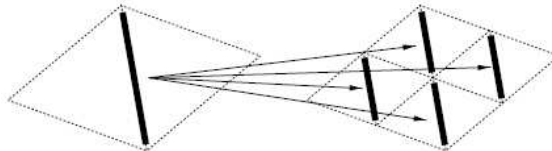


FIG. 1.22 – Association liant les arêtes d'un maillage multirésolution, utilisée par le codage zerotree. Image tirée de [58].

Un codeur entropique par plans de bits pour les données tridimensionnelles a également été étendu par rapport à la version d'origine, par Payan en 2004 [90]. Ces travaux permettent d'adapter le codage contextuel aux données, en se servant d'observations inhérentes aux maillages surfaciques semi-réguliers. Il ne se base plus nécessairement sur les huit plus proches voisins comme sur une grille régulière, mais exploite séparément les composantes tangentielle et normale des coefficients d'ondelettes, puisqu'ils n'ont pas la même dynamique. L'auteur obtient ainsi de meilleurs résultats en terme de compression qu'en considérant les contextes initiaux prévus pour les images.

Une quantification scalaire est généralement utilisée dans les deux cas de figure précédents, impliquant la mise en place de trois codeurs indépendants (un pour chaque coordonnée). Un codage arithmétique (expliqué à la section 1.7.2) est enfin ajouté pour se rapprocher de l'entropie du signal et obtenir la séquence de bits la plus compacte possible.



## 1.7 Le codage entropique

Le but du codage entropique est de tendre vers l'entropie du signal échantillonné. Le terme d'entropie est utilisé en théorie de l'information et désigne la limite minimale théorique du nombre de bits nécessaires au codage de l'information portée par un signal. Pour un signal contenant un nombre  $M$  de messages distincts (par exemple l'image à niveaux de gris codée sur 8 bits/pixel contient exactement 256 messages distincts), son entropie  $H$  peut être calculée grâce à la formule suivante :

$$H = - \sum_{i=1}^M p_i \log_2 p_i = \sum_{i=1}^M p_i I_i$$

où  $p_i$  représente la probabilité d'arrivée du message  $i$  et  $I_i = -\log_2 p_i$  l'information portée par ce même message.

Ainsi, pour s'approcher de cette limite, chaque symbole est représenté par un code de longueur variable, inversement proportionnel à sa probabilité d'apparition. Les informations les plus probables sont alors codées sur un petit nombre de bits.

Il existe plusieurs codeurs entropiques, dont les plus connus sont le codeur de Huffman [52] et le codeur arithmétique [97, 124] qui sont des méthodes statistiques.

### 1.7.1 Le codage de Huffman

Le codage de Huffman [52] code les symboles un par un à partir d'une analyse statistique préalable des données. Il est utilisé dans les normes de compression d'images (JPEG) ou de vidéos (MPEG). Chaque symbole est codé par un nombre entier de bits, ce qui empêche la plupart du temps de s'approcher très près de l'entropie du signal.

### 1.7.2 Le codage arithmétique

Le codage arithmétique [97, 124] permet de se rapprocher plus de l'entropie du signal, car il code une séquence de symboles par un seul nombre. Chaque symbole est ainsi représenté dans la séquence par un nombre de bits non nécessairement entier, afin de réduire encore l'espace occupé. Pratiquement, les différences constatées par rapport aux résultats atteints par Huffman restent assez minces, se traduisant par un gain de place de l'ordre de 4% ou 5% au plus, sauf cas très particuliers. Ce codage, dans sa version statique, se base également sur une analyse statistique préalable des données et est utilisé dans la norme JPEG 2000.

### 1.7.3 Les codeurs adaptatifs

Comme nous venons de le constater, les codages à base statistique nécessitent un examen préalable du fichier de manière à établir la table des probabilités d'apparition, et donc la quantité d'information associée à chaque symbole. Ceci étant souvent impossible à réaliser, il existe des versions adaptatives (dynamiques) des deux précédents codeurs, permettant le codage en temps réel de l'information à transmettre. Ainsi un tel codeur adaptatif n'intègre aucune donnée statistique sur les informations à coder, mais gère un dictionnaire adaptatif, qui contient les derniers symboles codés et s'enrichit au fur et à mesure. Ce dictionnaire est très utile pour réduire l'entropie du signal lorsque



des séquences de motifs réapparaissent.

Il existe enfin des codeurs dits semi-adaptatifs qui sont un mélange des deux méthodes décrites précédemment : un premier passage sur les données permet de construire un dictionnaire, un second effectue l'encodage. Ainsi, un dictionnaire optimal est construit avant encodage.

Nous avons ainsi présenté le contexte et les grands principes de la compression basée sur l'analyse multirésolution, nous permettant d'aborder l'état de l'art correspondant.

## Etat de l'art en analyse multirésolution de maillages surfaciques

Dans ce chapitre, nous passons en revue les grandes méthodes d'analyse multirésolution principalement utilisées dans des buts de compression des maillages surfaciques. Nous les différencions par l'aspect irrégulier, totalement régulier ou semi-régulier de la connectivité des maillages considérés, illustré par la figure 2.1. Pour les maillages surfaciques, la régularité de la connectivité est liée à la valence de chaque sommet, c'est-à-dire le nombre de ses arêtes incidentes (équivalent au nombre de ses sommets voisins). On distingue ainsi les trois types de maillages suivants :

- *les maillages irréguliers* où tous les sommets ont une valence différente ;
- *les maillages semi-réguliers* (dits à connectivité de subdivision) où un faible nombre de sommets ont une valence différente de six, puisque ces maillages sont construits par application d'un ensemble de subdivisions sur un polyèdre grossier, comme nous allons le voir dans ce chapitre ;
- *les maillages réguliers* où tous les sommets ont cette fois-ci la même valence, généralement égale à six.

Ainsi deux approches différentes peuvent être envisagées pour produire une représentation "scalable". Les méthodes sous-jacentes considèrent soit directement la structure irrégulière des maillages, (en terme de connectivité), soit se servent d'un remaillage pour rendre la structure plus régulière et proposer ainsi des techniques de compression proches de celles utilisées sur des grilles régulières.

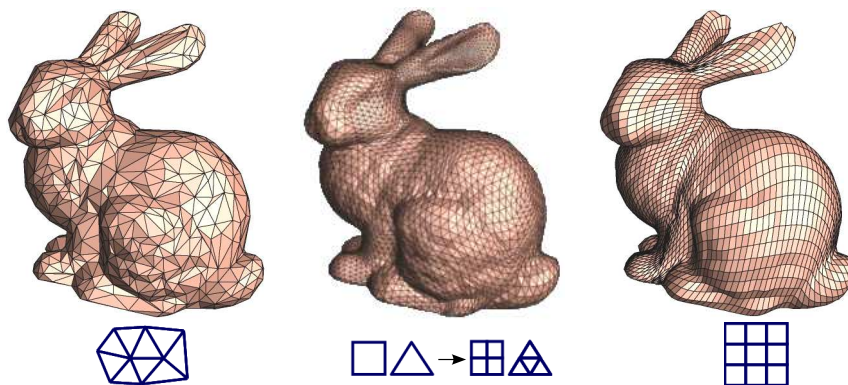


FIG. 2.1 – Comparaison entre connectivités irrégulière, semi-régulière et totalement régulière.

Chacune de ces méthodes, présentées dans la suite de ce chapitre, s'avère appropriée pour différents types d'applications visées ou spécifications particulières que nous précisons. Elles ont toutes la particularité d'appliquer une décomposition en ondelettes globale sur l'ensemble de la surface, excepté pour les maillages de très grande taille (composés de millions ou milliards de triangles) où un partitionnement est généralement utilisé pour ne pas risquer d'encombrer la mémoire ou d'engendrer des calculs trop coûteux de rendu. Nous évoquerons le fonctionnement de ces méthodes basées sur un partitionnement préalable au chapitre 5, afin de les comparer avec notre "framework" de compression adaptative et de visualisation sélective.

Avant de passer à la description des méthodes d'analyse multirésolution, rappelons certaines terminologies utilisées dans la suite de ce document, clairement énoncées par Guskov *et al.* [43].

## 2.1 Terminologie utilisée dans la suite de ce document

Premièrement, les trois grandes familles de maillages illustrées par la figure 2.1 sont définies formellement de la façon suivante : une triangulation irrégulière est constituée de sommets de  $\mathbb{R}^3$  de n'importe quel degré, contrairement aux triangulations régulières où tous les sommets sont de degré six. Enfin, un maillage semi-régulier (ou à connectivité de subdivision) est construit à partir d'un complexe de base (maillage très simple), par subdivisions successives. Il possède ainsi une majorité de sommets réguliers (hormis un faible nombre faisant partie du complexe de base).

Rappelons également que, contrairement aux images définies dans un repère Euclidien (planaire) la plupart du temps sur des grilles régulières, les maillages triangulaires sont des 2-variétés plongées dans un espace tridimensionnel et forment un complexe d'échantillonnage irrégulier. Ainsi de nouvelles formulations doivent être considérées pour comprendre la généralisation de l'analyse de Fourier et des méthodes de filtrage à ces structures particulières. Toutes les techniques d'analyse multirésolution considérées dans la suite de ce document sur des 2-variétés utilisent des schémas de subdivision pour produire un filtrage, suivi d'un sous-échantillonnage afin de décomposer les maillages en plusieurs niveaux de résolution.

Si un filtrage uniforme est souvent approprié pour les images, il n'en est généralement pas de même pour les maillages. En effet, les poids (ou coefficients) des filtres de subdivision dépendent soit uniquement de la connectivité (subdivision semi-uniforme), soit également de la géométrie (subdivision non-uniforme). Pour les schémas de subdivision s'appliquant sur des triangulations semi-régulières (présentés à la section 1.5.1), le raffinement est obtenu par quadrisection des triangles originaux. Les paragraphes suivants décrivent les méthodes utilisées pour traiter un complexe irrégulier.

De façon générale, la procédure de raffinement par subdivision d'un maillage est réalisée de la façon suivante, pour l'ensemble des méthodes existantes : les positions géométriques des sommets nouvellement insérés sont déterminées par des méthodes variationnelles. Ces dernières consistent à minimiser une fonctionnelle d'approximation discrète de l'énergie de "courbure". Les surfaces d'énergie minimale sont supposées être "justes" ("fair" en anglais, en référence à ce procédé appelé "discrete fairing"). Ainsi pour produire des schémas de subdivision non-uniformes, on cherche généralement une pa-

ramétrisation permettant d'approximer les courbures géométriques par des dérivées de deuxième ordre (produisant des coefficients linéaires). Dans le cas semi-uniforme, les poids des schémas de subdivision produisant de telles surfaces, sont habituellement obtenus par des techniques spectrales (en utilisant le Laplacien discret par exemple), qu'ont clairement expliqué Zorin *et al.* dans leur rapport technique [128]. Enfin un procédé de relaxation est généralement utilisé pour l'optimisation de ces opérateurs de lissage.

La généralisation de l'analyse de Fourier classique aux polyèdres discrets de topologie arbitraire a été introduite par Taubin [117, 119]. Il réduit ainsi le problème de lissage à un sur-échantillonnage suivi d'un filtrage passe-bas, où les fréquences sont définies par l'analyse discrète du Laplacien, généralisé aux triangulations irrégulières. En d'autres termes, Taubin a introduit la généralisation de la subdivision classique au cas irrégulier. Les schémas de lissage résultants ont été utilisés pour le débruitage, les déformations lisses et également pour construire des filtres de subdivision semi-uniforme sur des triangulations irrégulières.

Le problème majeur pour produire de tels raffinements sur des 2-variétés, réside dans le fait de trouver une paramétrisation appropriée entre les sommets initiaux et les sommets du maillage raffiné. Pour cela, on se ramène le plus souvent à un domaine paramétrique planaire dans lequel sont définis les "stencils", ce qui nous fait constamment jongler entre les complexes fonctionnel et surfacique, grâce à la paramétrisation définie. Le complexe fonctionnel est décrit par une fonction  $g(u, v)$  de deux variables indépendantes du plan. La variable dépendante  $g$  peut être alors visualisée comme un champ de hauteur. Cette formulation donne une nouvelle vision du problème, par analogie avec les méthodes régulières, vu comme la variation des normales aux triangles au sein du maillage. Ceci suppose alors qu'une paramétrisation différentiable ait été définie.

Le complexe surfacique étend ce premier complexe en considérant les sommets  $p_i = (x_i, y_i, z_i)$  du maillage où chaque coordonnée constitue un complexe fonctionnel. Les inconnues sont les paramètres indépendants  $u$  et  $v$  et doivent être estimés pour former des paramétrisations lisses (différentiables) qui sont le gage de la qualité des résultats pour la plupart des algorithmes numériques sous-jacents. Nous n'avons pas besoin ici de paramétrisations lisses globales, mais locales, pour être en cohérence avec le support restreint des schémas de filtrage sur ces structures.

## 2.2 Analyse multirésolution sur des maillages irréguliers

L'analyse multirésolution s'appliquant directement sur des maillages irréguliers a l'avantage de pouvoir traiter n'importe quel maillage d'entrée, qu'il provienne de tout type de numérisation ou modélisation. Ces derniers sont de plus en plus fréquemment rendus disponibles sur le Web, comme sur le "repository" AIM@SHAPE [48]. Mais en contrepartie, la structure topologique irrégulière sous-jacente requiert un plus grand nombre de bits pour la compression qu'avec une connectivité régulière ou semi-régulière. A noter que pour certains maillages issus par exemple de l'imagerie médicale, il arrive que le remaillage se révèle très difficile à mettre en oeuvre, à cause principalement de leur genre élevé, de leur structure non-manifold ou composée de multiples arêtes vives.

### 2.2.1 Méthodes pionnières

Bonneau *et al.* [11] ont introduit en 1996 le concept d'analyse multirésolution basé sur un ensemble d'espaces d'approximation non imbriqués. Ces espaces d'approximation remplacent ici les espaces d'échelle traditionnels, qui ne sont plus nécessairement imbriqués. Ils permettent alors de développer un cadre multirésolution pour les fonctions constantes ou linéaires par morceaux définies sur des triangulations irrégulières d'un domaine planaire ou sphérique [8]. La possibilité de traiter de tels maillages n'ayant pas une connectivité de subdivision, n'est possible que via l'utilisation d'espaces d'approximation non imbriqués. L'algorithme de décomposition/reconstruction correspondant utilise des ondelettes appelées "BLaC-wavelets" (Blending of Linear and Constant), permettant d'étendre les ondelettes de Haar.

Ces travaux ont été poursuivis avec Gerussi [9, 10], pour proposer une construction générale d'ondelettes de seconde génération. Des applications traditionnelles telles que la compression, la visualisation progressive ou l'édition hiérarchique ont été également généralisées à ces fonctions, pour lesquelles l'implémentation des algorithmes de décomposition et de reconstruction est plus délicate que dans le cas des ondelettes classiques. L'utilisation du cadre non emboîté dans le cadre de l'analyse multirésolution basé sur la décimation de maillages, que nous allons exposer par la suite, a également été considérée.

L'approche de Guskov *et al.* [43] développée en 1999, est une généralisation des méthodes de lissage de Taubin [117, 119] pour créer cette fois-ci des schémas de subdivision non-uniformes, indispensables pour former une analyse multirésolution sur des 2-variétés à connectivité irrégulière. Si des schémas de subdivision semi-uniformes pouvaient être considérés pour le lissage de ces structures [117, 119], il n'en est plus de même lorsque l'on veut définir une approche pyramidale. Pour proposer une telle simplification d'un maillage initial, permettant de le reconstruire avec la même connectivité par la suite, il n'y a pas d'autre choix que d'appliquer des filtres non-uniformes. L'important est de s'assurer que la paramétrisation locale sous-jacente est lisse pour assurer une bonne qualité des traitements ultérieurs.

La méthode de simplification progressive de maillages utilisée (*PM*) a été introduite par Hoppe en 1996 [45] et propose une décimation continue du maillage par contraction d'arête, produisant un très grand nombre de niveaux de détails. Afin de préserver au mieux la forme et l'apparence du maillage durant cette opération, une stratégie de sélection optimale des arêtes à traiter est utilisée. Celle-ci est combinée à un schéma de subdivision non-uniforme afin de produire la structure pyramidale souhaitée.

Leur schéma de subdivision (dont les poids dépendent de la géométrie et pas seulement de la connectivité), s'appuie sur une procédure de relaxation non-uniforme. Le but est de minimiser les différences entre normales associées à deux triangles voisins ("divided differences" ou différence de second ordre), dans un contexte surfacique multivarié (défini à la section 2.1). L'opérateur de relaxation non uniforme sous-jacent, généralise la notion de filtre passe-bas. Il consiste en effet à minimiser l'énergie de la différence entre ces normales, ce qui revient bien à un lissage du maillage.

Plusieurs applications sont illustrées comme le lissage ou son opposé (le réhaussement de détails), le filtrage, l'édition multirésolution précédemment introduite sous

forme semi-uniforme par Kobbelt *et al.* [59] et enfin le placage de texture. En terme de compression, étant donné que les poids du schéma de subdivision proposé dépendent de la paramétrisation du maillage original, il ne pourrait servir que de prédicteur pour la dimension géométrique seule. Dans ce cas, il faudrait que le codeur et le décodeur partagent l'information paramétrique sous-jacente, ce qui implique un surcoût par rapport aux méthodes utilisant un remaillage. C'est pourquoi la majorité des méthodes de compression de maillages utilisent un remaillage dont le but est de réduire au maximum les informations topologiques et paramétriques, pour éviter ce surcoût.

Pour finir, cette approche a été choisie par Guskov *et al.* [40] pour compresser des séquences de maillages isomorphes (de même connectivité) par transformée en ondelettes. Le problème énoncé ci-dessus est ici évité car la première frame sert de domaine paramétrique, qui est cette fois-ci connu au codage et au décodage. Ainsi les autres frames sont transformées en ondelettes à partir de la première, qui est codée séparément par une technique de compression de maillage statique avec pertes [55]. Enfin, cet algorithme a la particularité de proposer une modification du schéma de prédiction de 1999, pour mieux prédire les formes possédant des arêtes vives (intervenant dans l'animation de personnages par exemple) et bénéficier d'une compression anisotrope.

### 2.2.2 Méthodes plus récentes

Valette *et al.* [122] ont proposé un nouveau schéma d'analyse multirésolution par ondelettes sur les maillages irréguliers, en complétant le schéma de subdivision introduit par Lounsbery [75] par de nouveaux schémas de subdivision irrégulière. Ils définissent ainsi dix nouveaux schémas de "subdivision partielle" adaptés aux différents types d'irrégularité. Il est alors nécessaire d'ajouter un code de plus, correspondant à la description de la subdivision utilisée pour chaque face. Onze codes différents sont à considérer, en incluant la subdivision classique  $1 \times 4$  (illustrée sur le schéma de la figure 1.11). Une redéfinition du produit scalaire entre les vecteurs de base, introduit également par Lounsbery [75], est alors nécessaire afin de "lifter" les ondelettes et obtenir les approximations les plus fidèles possibles. Les approximations intermédiaires produites ici lors de l'analyse par subdivision inverse sont plus restreintes en comparaison de celles engendrées par la méthode précédente, où des opérations atomiques de décimation étaient considérées.

Les coefficients obtenus sont ensuite codés par zerotree adapté aux maillages irréguliers [123], suivi d'un codage arithmétique. Cette approche propose un codage de maillages sans perte, compte tenu du fait qu'elle conserve la connectivité initiale, car aucun remaillage n'est utilisé. Celle-ci a été intégrée à une technique de segmentation et de suivi d'objets vidéos [122].

D'autres auteurs ont également directement travaillé sur les maillages irréguliers et définit une analyse multirésolution par ondelettes de seconde génération (lifting scheme) pour coder en plus de l'aspect géométrique, les attributs d'apparence associés généralement aux maillages sous forme de couleur ou de texture [101] ou également la température, la radiation ... utilisés par exemple en calculs par éléments finis. Les auteurs utilisent le principe de décimation/raffinement de Hoppe [45] pour les opérations de sur et sous-échantillonnage. Au lieu de procéder par opération atomique, ils forment des ensembles d'arêtes indépendantes à contracter, par sélection incrémentale basée sur



la métrique de Garland *et al.* [31]. Le maillage simplifié obtenu possède ainsi une apparence visuelle optimale.

Les attributs (géométrie, couleur, texture, ...) sont considérés comme des vecteurs dans un espace Euclidien relié à chaque sommet, représenté sous forme de tableau d'attributs. L'opérateur de prédiction se sert de la géométrie locale pour minimiser par relaxation une nouvelle énergie de courbure liée à chaque arête [84], différente de celle utilisée par les méthodes pionnières. Cet opérateur de relaxation garantit des variations lisses des attributs. Ces attributs complètent alors l'information géométrique et se révèlent importants pour la modélisation de terrains, car ils reflètent la nature même de ceux-ci.

### 2.3 Généralités sur la paramétrisation et le remaillage

Afin d'étendre les méthodes utilisées en traitement du signal numérique (appliquées habituellement sur des signaux réguliers) au cas des 2-variétés, leur connectivité peut être modifiée sans que cela ne soit trop perceptible. A ce sujet, Khodakovsky *et al.* [58, 56] ont fait remarquer qu'une méthode de remaillage associée à une technique de compression adaptée permettent de réduire d'un facteur 4 l'erreur de reconstruction pour un même taux de compression, en comparaison des méthodes préservant la connectivité du maillage original. Ces dernières doivent en effet jouer sur la quantification des coordonnées géométriques afin d'obtenir des taux de compression comparables, ce qui produit une erreur géométrique plus importante. Les performances des algorithmes de compression basés sur de tels remaillages sont ainsi très dépendants de la qualité de la paramétrisation utilisée, comme pour les cas irréguliers énoncés précédemment. Enfin, comme beaucoup de modèles géométriques sont obtenus à partir de techniques de numérisation scanner, la connectivité précise dans ces maillages très denses est alors arbitraire, sans oublier les erreurs numériques produites par ce genre d'appareils.

Le remaillage permet ainsi d'approximer au mieux la géométrie du modèle original tout en maintenant une complexité du maillage acceptable. Il existe un grand nombre de techniques de remaillage qui se différencient principalement par la paramétrisation utilisée, s'appuyant sur des métriques d'erreur différentes.

On définit par paramétrisation la correspondance entre une surface et un domaine paramétrique, ce qui revient à déplier la surface sur le domaine de paramétrisation. Le plus souvent, ce dépliement s'effectue sur un carré unitaire (illustré par la figure 2.2) ou un cercle trigonométrique, permettant de traiter la surface comme si elle était plate. Mais le domaine paramétrique peut également être une sphère [37] ou tout autre surface plus complexe. De façon plus précise, on parle de "mesh embedding" pour définir le placage des sommets dans le domaine paramétrique qui est généralement linéaire par morceaux (à l'intérieur de chaque triangle) et où aucune arête ne doit se croiser dans le plan. La paramétrisation de maillage ("mesh parameterization") est l'opération inverse.

La paramétrisation est principalement utilisée pour le placage de textures, mais également pour rééchantillonner (remailler) une surface ou y appliquer des outils de traitement du signal (lissage, analyse multirésolution ...), ainsi que pour la réalisation de calculs géométriques, qui se révèlent être moins coûteux dans un domaine de dimension inférieure.

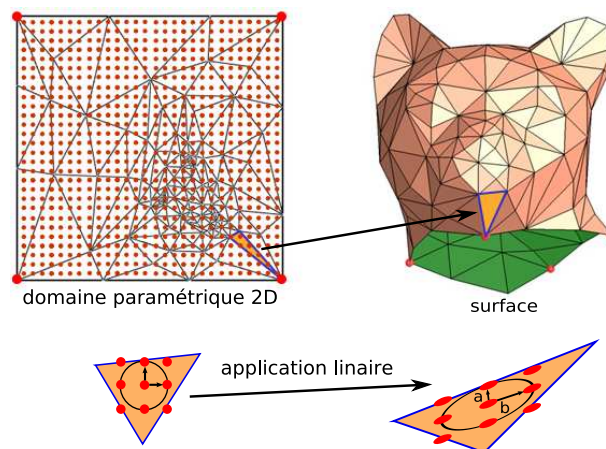


FIG. 2.2 – Illustration d’une application linéaire du domaine 2D vers un maillage plongé dans l’espace tridimensionnel. La paramétrisation est définie par l’application inverse où les paramètres  $a$  et  $b$  sont les valeurs singulières traduisant la distorsion induite par cette application.

Plus précisément, il s’agit de trouver, pour les surfaces approximées par des maillages triangulaires, une fonction continue et linéaire par morceaux  $\Phi$  (i.e. pour chaque polygone du maillage), pour laquelle chaque point de coordonnées  $(x, y, z)$  du maillage ait une image  $(u, v)$  dans le domaine paramétrique. La difficulté pour construire une telle fonction réside alors dans la minimisation des déformations angulaires et du changement des longueurs et des aires. Plusieurs méthodes standard permettent de minimiser ces distorsions dans le plan, pour des objets topologiquement simples (homéomorphes à un disque ou une sphère). La librairie géométrique CGAL [49] (the Computational Geometry Algorithms Library) en propose plusieurs depuis peu, qui sont regroupées ci-dessous en fonction de la distorsion générée (traduite par les valeurs des paramètres  $a$  et  $b$  représentés sur la figure 2.2) :

- les paramétrisations conformes [28, 78, 25], qui préservent les angles ( $a = b$ );
- les paramétrisations aouthaliques [22], qui respectent les aires ( $ab = 1$ );
- les paramétrisations isométriques (conforme + aouthalique) qui sont plus rares et pour lesquelles  $a = b = 1$ .

Les paramétrisations conformes (ou quasi-conforme) sont les plus étudiées dans la mesure où elles conservent au mieux la géométrie de la surface paramétrisée. Mais d’autres métriques sont également utilisées pour minimiser les étirements géométriques. Les lecteurs intéressés peuvent consulter le livre de Floater et Hormann [29].

Malheureusement il existe un grand nombre de maillages non homéomorphes à un disque ou une sphère pour lesquels la construction d’une fonction de paramétrisation s’avère beaucoup plus difficile. Les premières méthodes de paramétrisations conçues pour ce type d’objets étaient plus particulièrement destinées au placage de textures sur la surface de ceux-ci [79, 103]. Elles proposent pour cela une généralisation des techniques décrites précédemment aux surfaces de topologie arbitraire. Une première phase consiste alors à diviser la surface en somme de surfaces développables, qui sont ensuite paramétrisées indépendamment dans le plan par une des méthodes décrites précédemment, pour former ce qu’on appelle communément un atlas.



Leurs résultats théoriques sont satisfaisants, mais des discontinuités apparaissent entre les fragments dues à une paramétrisation individuelle de chacun d'entre eux, sans définir une correspondance continue. Ces discontinuités se traduisent par des artéfacts visibles lors du placage de texture. Une première idée consiste à réduire les zones de découpe ou de les dissimuler. Il existe enfin un grand nombre de méthodes introduites pour résoudre ce problème, par construction d'une paramétrisation globalement lisse. Celles servant à définir une analyse multirésolution sont exposées dans la suite de ce chapitre, à la section 2.7.

C'est en s'appuyant sur ces considérations que de nouvelles méthodes de paramétrisation, propices à l'application d'une transformée en ondelettes, ont vu le jour. Elles se différencient principalement par la nouvelle représentation du maillage qui peut être semi-régulière, régulière ou adaptée à la courbure et la rugosité du maillage. C'est pourquoi un grand nombre de méthodes procèdent au remaillage des objets de telle sorte que le signal géométrique soit rééchantillonné sous forme de patchs réguliers et uniformes sur lesquels l'analyse multirésolution est bien définie.

La principale contrainte pour les méthodes de remaillage réside dans le fait de trouver un bon domaine de paramétrisation engendrant une faible distorsion. Les méthodes présentées à la section suivante considèrent le cas extrême où un maillage est paramétrisé sur un unique "patch" obligeant la création de zones de découpe, pour les surfaces fermées ou de genre élevé.

## 2.4 Remaillage régulier sous forme d'image géométrique

Habituellement, pour associer une texture ou d'autres attributs à un maillage, il est nécessaire de disposer des coordonnées paramétriques de chaque sommet ou triangle (non triviales), préalablement calculées grâce à la définition d'une paramétrisation. Pour faciliter cette procédure, la méthode de paramétrisation de Gu *et al.* [38] propose de représenter les maillages sous forme d'images géométriques permettant ainsi de rendre implicite les coordonnées paramétriques.

Pour pouvoir effectuer cette paramétrisation planaire, ils utilisent une découpe topologique de la surface qui engendre le dépliement des objets fermés. Afin de minimiser les étirements géométriques lors de la paramétrisation, la découpe passe habituellement par les extrema de courbure du maillage, ce qui permet d'estomper les discontinuités produites habituellement par les atlas (évoqués à la section précédente). On obtient ainsi une frontière "artificielle" du maillage fermé, permettant une minimisation des étirements sur l'ensemble de la surface, mais la zone de découpe reste visible.

Une fois la phase de paramétrisation établie, le domaine paramétrique est alors rééchantillonné de façon régulière. La correspondance entre ce domaine planaire et le maillage permet ainsi de coder les coordonnées géométriques  $(x, y, z)$  du maillage par les 3 canaux  $(r, g, b)$ , produisant une image qualifiée d'image géométrique. Les informations topologiques (codées implicitement) s'interprètent alors dans ces images géométriques par paquets de  $2 \times 2$  pixels, représentant deux triangles adjacents. Pour connaître la diagonale séparant ces deux triangles, il faut alors considérer celle possédant la plus courte distance. Les grandes étapes que nous venons d'expliquer sont illustrées sur la

figure 2.3.

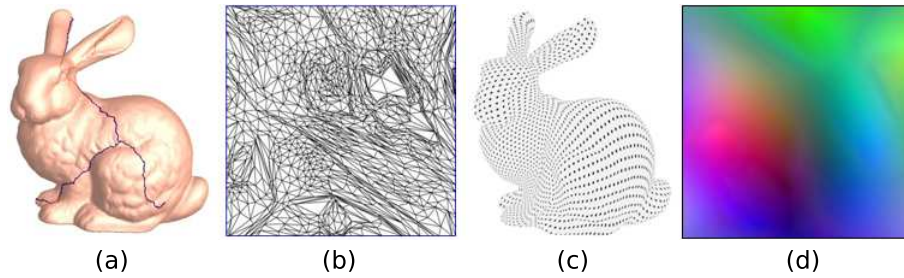


FIG. 2.3 – Illustration des grandes phases de l'algorithme de Gu *et al.* [38]. (a) chemin de découpe sur le maillage bunny, (b) paramétrisation résultant du dépliement de la surface sur un domaine planaire, (c) rééchantillonnage sur la surface d'origine et (d) transformation en image géométrique.

A ces images géométriques, il est alors possible d'associer des cartes de normales, comme le montre la figure 2.4, afin de procéder au rendu des objets, qui peuvent être texturés directement depuis le GPU (Graphics Processing Unit : processeur spécialisé dans le traitement graphique). Grâce à cela, il est possible de simplifier l'information géométrique (représentée généralement par une image de résolution plus faible que celle correspondant à la carte de normales) qui sera alors "raffinée" grâce à la carte de normales apportant les détails haute-fréquence.

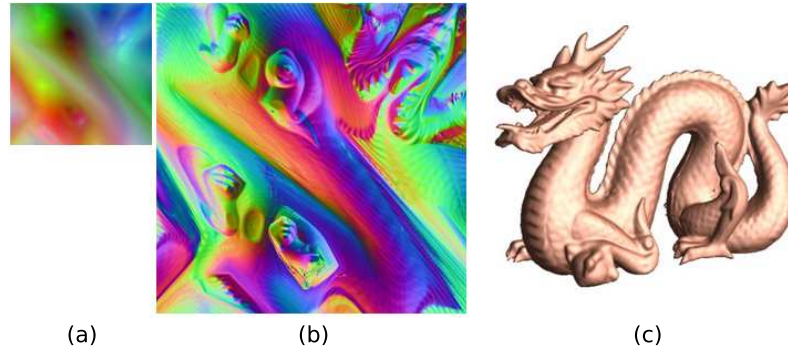


FIG. 2.4 – Illustration du procédé de reconstruction par images géométriques. (a) image géométrique (de résolution 257x257) et (b) carte de normales associée (de résolution 512x512), pour l'objet "Dragon" (c). Image tirée de [38].

Pour la compression de ces maillages réguliers, les méthodes classiques d'analyse multirésolution 2D [81, 106] sont généralement utilisées et peuvent être améliorées par le codage de "bandlets" [92], concept spécialement introduit pour obtenir une meilleure compression des formes géométriques. Cette technique émergente permet d'éliminer une partie de la redondance que les ondelettes seules ne permettent pas de retirer. Pour cela, on cherche dans chaque sous-bande de coefficients, une direction géométrique privilégiée. Une nouvelle prédiction peut alors être effectuée pour les coefficients dans cette direction, à partir d'une transformée en ondelettes 1D.

Pour diminuer la distorsion importante induite par le placage d'un maillage 3D sur un plan et réduire les discontinuités le long de la découpe lors du placage de tex-

ture, Sander *et al.* [104] ont proposé l'utilisation de patchs. La surface est alors régulière par morceaux. Ils utilisent un principe de couture pour refermer les discontinuités engendrées par l'atlas créé. Ces dernières se trouvent alors clairement supprimées, cependant, il apparaît un effet de flou dans les zones traitées et les temps de calculs sont relativement longs. Une nouvelle méthode est alors envisagée par Losasso *et al.* [74], pour rendre plus lisses les zones de découpe. C'est à cette même période que les images géométriques sphériques [93] font leur apparition. Seuls les objets de genre zéro sont considérés. Aucune découpe n'est ici nécessaire, mais la distorsion reste difficile à contrôler. Enfin les images géométriques ont récemment été adaptées pour l'animation de maillages [12].

Une alternative à ce type de remaillage consiste à augmenter le nombre de patchs du complexe paramétrique, pour éviter les découpes, qui sont parfois délicates à dissimuler. Ces approches semi-régulières supposent également que les applications cibles n'imposent pas un schéma de compression sans perte. Les principales méthodes de remaillage semi-régulier reposent sur la même philosophie qui a pour but de rendre implicite l'information de connectivité (excepté pour le maillage grossier) et de réduire l'information paramétrique, pour permettre de représenter les détails avec leur seule partie géométrique. Pour chacune de ces techniques, le maillage irrégulier d'origine est d'abord simplifié jusqu'à obtenir un "complexe de base" grossier dans lequel les sommets originaux sont projetés pour pouvoir alors procéder au raffinement par quadrisection canonique, comme illustré par la figure 2.5. Les modèles construits se rapprochent ainsi de ceux obtenus par les méthodes utilisant une paramétrisation régulière sous forme d'image géométrique, où les sommets sont positionnés plus régulièrement et ont en majorité le même nombre de voisins, mais ici aucune découpe n'est nécessaire.

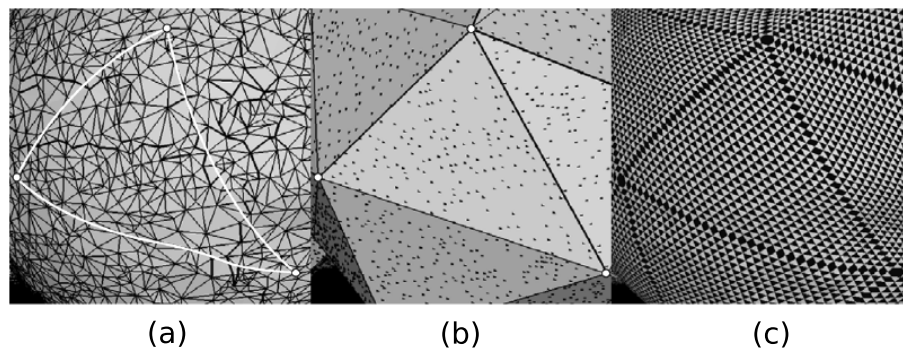


FIG. 2.5 – Exemple du remaillage semi-régulier où chaque sommet irrégulier à l'intérieur de la région délimitée par les courbes blanches (a) est projeté (points noirs sur l'image (b)) dans le triangle grossier correspondant du complexe de base obtenu par simplification (b). (c) Formation du maillage semi-régulier par quadrisection canonique et en utilisant une interpolation des positions d'origine. Schéma tiré de [110].

La simplification de maillages permet alors de produire le complexe de base sur lequel le modèle initial est paramétrisé. La phase de paramétrisation produit plus précisément une correspondance entre les sommets du modèle 3D et leur triangle du complexe de base sous-jacent. Deux courants différents sont considérés pour construire ce complexe, de même topologie que la surface originale. Il peut ainsi être obtenu par partitionnement de la surface initiale et simplification des patchs ou par un ensemble de décimations progressives. Le remaillage semi-régulier n'est pas seulement intéressant

en terme de compression, mais aussi pour un grand nombre d'applications comme la visualisation adaptative en fonction du point de vue de l'utilisateur ("view-dependent"), spécifiée notamment dans la norme MPEG-4 AFX [35]. Le placage de texture, la visualisation interactive [13] ou encore l'édition hiérarchique de maillages [130] tirent également profit de ce procédé de ré-échantillonnage.

## 2.5 Remaillage semi-régulier construit par raffinement

### 2.5.1 Technique pionnière

Lounsbery *et al.* [75] ont d'abord proposé une technique de remaillage par raffinement, en partant d'un modèle très simple (un octaèdre par exemple), pour ensuite introduire le concept d'ondelettes de subdivision sur des surfaces compactes de topologie arbitraire. Ces dernières sont construites de façon à ce qu'elles soient les plus orthogonales possibles aux fonctions d'échelles. Le produit scalaire utilisé est alors défini pour les maillages surfaciques triangulaires.

La méthode de compression avec pertes proposée code alors le maillage de base (octaèdre) par une méthode sans perte monorésolution. Les pertes introduites proviennent de l'ensemble des coefficients pour lesquels seul un sous-ensemble est conservé en fonction de leur importance. Plusieurs méthodes sont proposées pour réaliser cette sélection :

- Le seuillage, permettant de ne conserver que les coefficients dont l'amplitude est supérieure à un seuil. Cette méthode est la plus simple mais elle donne de bons résultats.
- Le raffinement progressif  $L^2$ , qui assure que l'information la plus importante est reconstruite d'abord. La séquence d'approximations est alors raffinée par les coefficients, pris dans l'ordre décroissant de leur amplitude. Chaque approximation est alors la meilleure possible en terme de moindres carrés, mais il est nécessaire de commencer par trier les coefficients, ce qui ralentit le processus.
- L'erreur maximale  $L^\infty$  peut aussi être utilisée à la place de l'erreur moyenne dans les régions de petite taille. Ceci garantit alors que le maillage reconstruit n'est pas éloigné de la forme originale de plus d'un certain seuil.
- La sélection des coefficients par régions d'intérêt est également possible, afin de procéder à un raffinement adaptatif.

Le principal défaut de cette approche est qu'il faut plusieurs itérations avant d'obtenir une forme ressemblant à l'objet de départ, sachant que pour les maillages complexes, il est souvent difficile d'y aboutir en partant d'un polyèdre simple.

### 2.5.2 Techniques basées sur un partitionnement de l'objet initial

Afin de réduire le nombre d'itérations nécessaire lors de la reconstruction, Eck *et al.* [25] proposent de construire le maillage de base en partant d'un partitionnement du modèle initial en cellules de Voronoï, basé sur la distance géodésique. Le maillage grossier est alors obtenu par le dual géométrique du diagramme de Voronoï : la triangulation de Delaunay. L'algorithme de partition utilise les cartes harmoniques permettant de préserver au mieux les longueurs et angles du maillage initial  $M$ , tout en obtenant

un minimum de triangles dans le maillage de base.

Chacun des  $m$  sommets situés à l'intersection des partitions servent alors à définir une base canonique de  $\mathbb{R}^m$  dans laquelle un maillage appelé "complexe de base" est utilisé comme domaine de paramétrisation. Chacune de ses faces correspond à un triangle du maillage initial. Une paramétrisation locale peut ensuite être construite entre chaque triangle de  $M$  et la face associée dans le "complexe de base". Cette paramétrisation est obtenue à partir d'une approximation linéaire par morceaux des cartes harmoniques, afin de minimiser les distorsions lors de la paramétrisation de l'ensemble des courbes. Ces paramétrisations locales s'assemblent de façon continue.

Les cartes harmoniques, dont un exemple est présenté à la figure 2.6 permettent la minimisation d'une énergie élastique associée au maillage, dans le domaine paramétrique. Pour bien comprendre le principe, on peut s'imaginer que le domaine de paramétrisation est composé de triangles élastiques, cousus ensemble le long de leurs arêtes. Après avoir fixé les frontières pour former un polygone convexe, la carte harmonique est alors définie par la configuration produisant l'énergie élastique minimale pour le système. On peut également considérer que chaque arête est un ressort qui concentre l'énergie élastique de ses deux triangles adjacents.

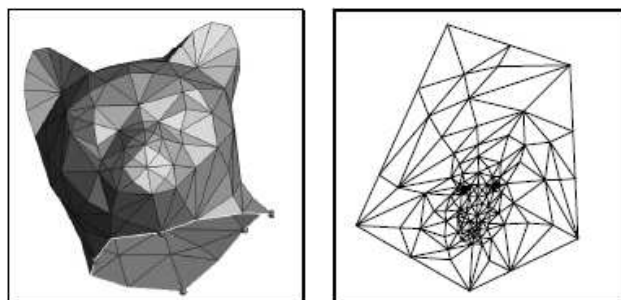


FIG. 2.6 – Représentation d'une carte harmonique permettant la minimisation d'une énergie élastique associée à un maillage. A droite : carte harmonique associée au maillage de gauche. Les sommets représentés par des petites boules (situés au niveau du cou, sur le schéma de gauche) correspondent aux bords de la carte harmonique que l'on fixe en premier. Le traitement suivant consiste à minimiser l'énergie élastique du système. Schéma tiré de [25]

Après plusieurs étapes de subdivision du complexe de base, on obtient alors une suite de maillages auxquels sont ajoutés un déplacement des sommets dans  $\mathbb{R}^3$  en utilisant la paramétrisation locale construite. Cette méthode automatique, dont le schéma général est rappelé à la figure 2.7, garantit des bornes d'erreurs pour les maillages résultants, mais il est difficile de contrôler la complexité du domaine de base. Une fois le remaillage produit, le principe d'analyse de Lounsbery *et al.* [75], décrit précédemment, peut être utilisé pour convertir le résultat du remaillage en une représentation multirésolution et procéder à sa compression.

Nous venons de voir que les méthodes décrites précédemment sont basées sur une adaptation de la théorie des ondelettes pour les maillages. Pour pouvoir procéder à cette extension, il est nécessaire de transformer le problème géométrique en problème d'analyse fonctionnelle. Or, comme l'a fait remarquer Gioia dans [34], cette transformation



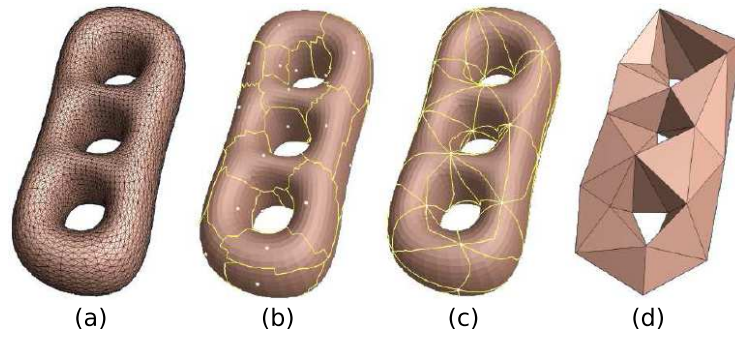


FIG. 2.7 – Illustration de la phase d’obtention du maillage de base dans la méthode de Eck *et al.* [25]. (a) le maillage d’origine, (b) le diagramme de Voronoï, (c) la triangulation de Delaunay et (d) le maillage grossier obtenu. Schéma tiré de [25]

n’est pas unique et dépend fortement du remaillage utilisé. Ainsi la partition en cellules de Voronoï et la paramétrisation utilisées par Eck *et al.* [25] génèrent un maillage de base généralement très peu fidèle géométriquement au maillage initial, car les bases d’ondelettes ne sont pas suffisamment adaptées aux propriétés géométriques du modèle à représenter. Un grand nombre de raffinements est alors nécessaire lors de la reconstruction, ne permettant pas d’obtenir les taux de compression promis par la théorie.

En partant de ces considérations, Gioia [34] a proposé une amélioration, reposant sur une paramétrisation respectant les caractéristiques géométriques et les propriétés visuelles du maillage. Pour cela, l’algorithme de remaillage s’appuie sur un partitionnement de la surface initiale et construit une paramétrisation préservant les zones à hautes variations, afin d’obtenir un maillage de base ressemblant plus à l’objet. Les étapes utilisées sont illustrées par la figure 2.8. Gioia cherche ainsi à minimiser les variations géométriques et topologiques avec la surface initiale. Cela se traduit par exemple par une conservation des arêtes vives dans l’approximation la plus grossière, pour lesquelles il faut en théorie un nombre infini de coefficients pour procéder à leur raffinement en partant d’une zone lisse. Le partitionnement est construit de telle sorte que les singularités géométriques se retrouvent au niveau des frontières des patches, afin que ces derniers soient aussi planaires que possible. Ces patches sont ensuite paramétrisés au moyen de cartes harmoniques.

L’extension proposée permet d’obtenir en moyenne deux fois moins de coefficients d’ondelettes sur des objets naturels et réduit le nombre de raffinements à effectuer tout en conservant une bonne approximation du modèle. Elle donne également de bons résultats sur les objets de type CAO, puisque l’erreur géométrique calculée sur l’objet *fandisk* est divisée par plus de deux par rapport à celle obtenue par la méthode de Eck *et al.* [25], pour un nombre de coefficients équivalent (illustrations sur la figure 2.9).

Ces méthodes "énergétiques" sont basées sur le même principe : définir l’énergie analytiquement, fixer les coordonnées paramétriques d’un point (généralement les points de la frontières des patches) et résoudre le système pour les autres points par la méthode des gradients conjugués. Plus récemment, Guskov [39] a également proposé un algorithme de partitionnement pour un remaillage basé sur une paramétrisation globalement lisse, que nous détaillons à la section 2.7.

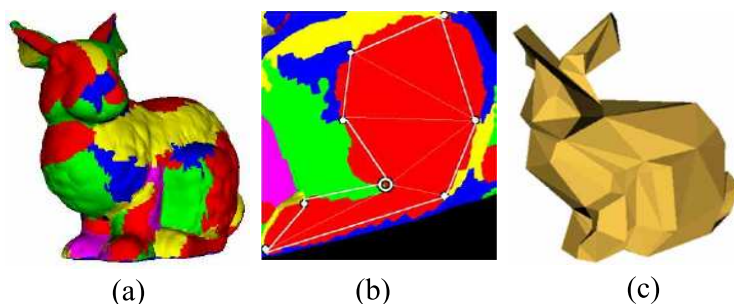


FIG. 2.8 – Etape de construction du domaine paramétrique de base dans la méthode de Gioia [34], sur l'objet Bunny (70K facettes). (a) Partitionnement de la surface initiale, (b) zoom, montrant la sélection de points particuliers pour la construction de la triangulation de chaque composant, (c) Domaine de base contenant 160 facettes. Images tirées de [34].

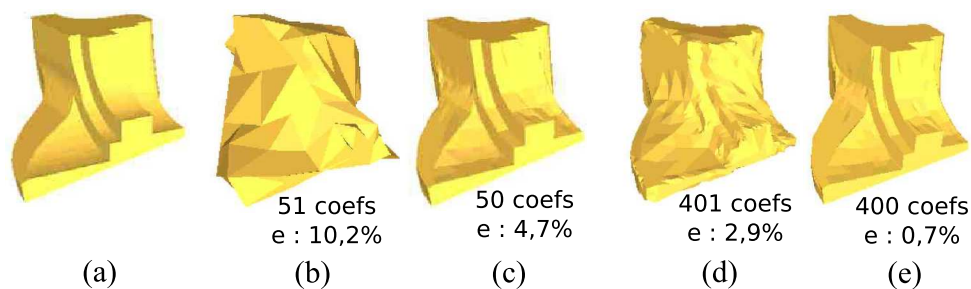


FIG. 2.9 – Comparaison des reconstructions produites sur l'objet fandisk par les méthodes de Eck *et al.* [25] et Gioia [34]. (a) Objet original, (b, c) Approximations produites respectivement par l'algorithme de Eck *et al.* puis celui de Gioia, en ne considérant qu'une cinquantaine de coefficients d'ondelettes en moment de la reconstruction. Une estimation du pourcentage de l'erreur géométrique (distance de Hausdorff) entre le modèle initial et l'approximation est précisée. (d, e) Mêmes résultats en prenant en compte plus de coefficients. Images tirées de [34].

## 2.6 Remaillage semi-régulier construit par décimation

Le deuxième courant de techniques produisant un remaillage semi-régulier, consiste premièrement à appliquer une simplification séquentielle du maillage original, de façon à créer la hiérarchie de maillages simplifiés. Ces approximations sont obtenues grâce à l'opération atomique de suppression de sommet ou de contraction d'arête. Chaque méthode utilise une métrique spécifique pour déterminer les sommets à supprimer ou les arêtes à contracter. Le maillage le plus grossier obtenu est enfin raffiné régulièrement par subdivision et ajouts de détails, pour aboutir à une approximation fidèle du modèle initial.

### 2.6.1 Méthode pionnière : MAPS

L'algorithme MAPS [67] commence par supprimer les sommets pour lesquels l'approximation résultante produit les plus faibles erreurs géométrique et topologique. Un algorithme glouton est ainsi exploité pour trouver l'ensemble maximal de sommets indépendants à chaque niveau de résolution. Cette étape de simplification s'inspire des travaux de [23] qui garantissent une borne logarithmique sur le nombre de niveaux produits.

Les auteurs utilisent ensuite une paramétrisation conforme consistant à exprimer les sommets supprimés à l'aide de coordonnées barycentriques calculées par rapport à leurs voisins les plus proches, dans la nouvelle configuration. A la fin du processus de simplification, chaque sommet du maillage d'entrée est associé à un triangle du complexe de base, comme illustré par la figure 2.10 et ses coordonnées barycentriques sont conservées. La paramétrisation bijective détermine alors le déplacement nécessaire à appliquer aux nouveaux sommets créés grâce à la subdivision de Loop [72], pour produire une bonne approximation semi-régulière à partir du complexe de base. Le remaillage proposé peut enfin s'adapter à la courbure de l'objet.

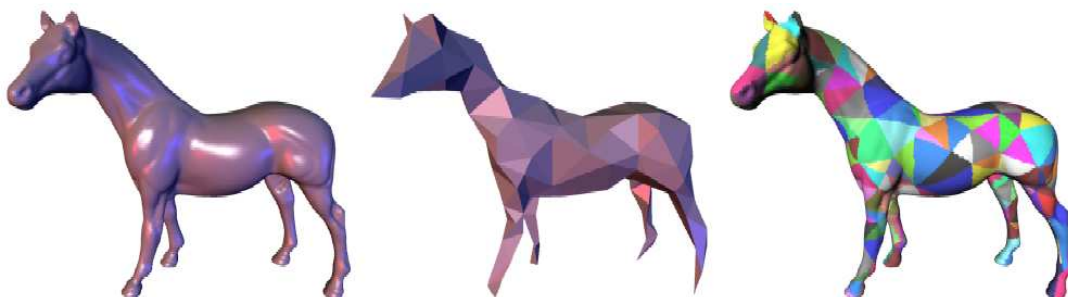


FIG. 2.10 – Aperçu de l'algorithme MAPS sur le modèle "Horse". A gauche : modèle original. Milieu : domaine de paramétrisation obtenu par simplification de maillage. A droite : régions du maillage original associées aux triangle du complexe de base. Images tirées de [67].

### 2.6.2 Méthodes basées sur une représentation scalaire des détails

L'algorithme "Normal Mesh" (NM) développé par Guskov *et al.* [44], construit comme MAPS un maillage de base topologiquement équivalent par simplification séquentielle



basée cette fois-ci sur la contraction de demi-arêtes [31]. La différence avec la contraction d'arêtes est présentée sur le schéma de la figure 2.11. La paramétrisation globale des patches disjoints utilise cette fois la méthode de Floater [28] au lieu des coordonnées barycentriques. Mais la grande différence réside dans la représentation hiérarchique produite, où les sommets éliminés au niveau  $l$  sont exprimés sous forme de scalaires ("offsets") dirigés le long de la normale à la surface, lors du passage au niveau plus grossier  $l - 1$ . Cette procédure permet ainsi que les détails ajoutés après subdivision (Butterfly [24]) n'aient qu'une unique composante normale.

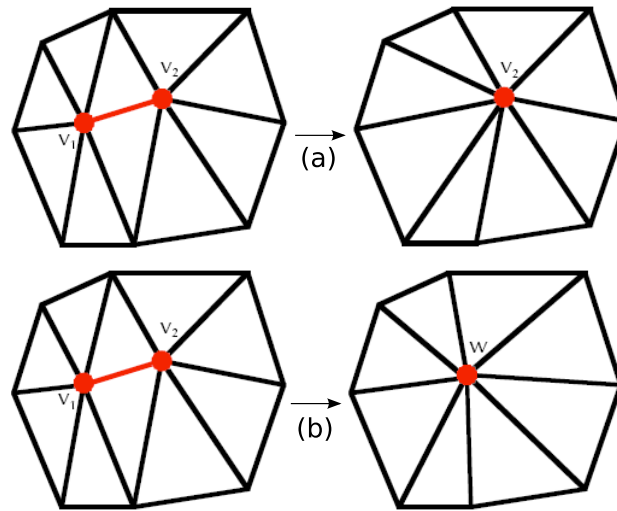


FIG. 2.11 – Schéma représentant la contraction d'arête (a) et de demi-arête (b).

Les maillages semi-réguliers résultants engendrent actuellement les meilleurs taux de compression, puisque la transformée en ondelettes associée produit alors des détails géométriques sous forme de scalaires et non plus sous forme de vecteurs 3D. Pour un petit nombre de sommets, qualifiés de sommets non normaux ( $< 10\%$  en moyenne), il n'est souvent pas possible de les représenter par un simple "déplacement normal". Dans ce cas les détails correspondant sont codés par des vecteurs tridimensionnels, ce qui ne modifie pas de façon significative les résultats en terme de compression. Enfin, un remaillage adaptatif peut également être utilisé en entrée de la transformée, afin d'obtenir un bon compromis entre l'erreur de reconstruction et la taille du modèle résultant. Cet algorithme ne traite que les surfaces fermées, mais une extension a été proposé plus récemment pour le cas des maillages à bords [68].

En 2004, Friedel *et al.* [30] proposent un nouvel algorithme de remaillage sous forme "normale" grâce à la construction d'une paramétrisation globalement lisse. Nous détaillons le procédé utilisé à la section 2.7, relatif à cette nouvelle approche paramétrique.

Deux méthodes récentes [110, 126] mélangent les techniques de remaillage des algorithmes NM [44] et MAPS [67]. La méthode de Yang *et al.* [126] (désignée par la suite par NM2), utilise l'étape de remaillage pour la compression progressive d'objets dynamiques tridimensionnels, alors que celle de Sim *et al.* [110] (NM3) l'exploite pour la compression et la transmission sélective d'objets 3D statiques.

Etant donné une séquence irrégulière, le premier algorithme (NM2) remaille d'abord la première frame et la met en correspondance avec les suivantes pour procéder à l'estimation hiérarchique du mouvement. Les processus de décimation et de raffinement par subdivision sont globalement identiques à ceux utilisés pour produire les NM, à part pour la paramétrisation qui est la même que celle utilisée par MAPS. En termes de remaillage, la forme des triangles du maillage semi-régulier obtenu par la méthode de Yang *et al.* [126] n'est pas toujours très régulière surtout lorsque les facettes grossières ne sont pas pas équilatérales, même si au sein d'un triangle grossier, les sommets sont positionnés régulièrement. L'intérêt de cet algorithme de remaillage est de facilement compresser les séquences dynamiques possédant des changements de structures importants, par la mise en correspondance des connectivités de chaque frame. L'algorithme de compression utilise une transformée en ondelettes spatio-temporelle, comme dans [41].

Sim *et al.* [110] font alors remarquer que l'algorithme NM repositionne chaque sommet du complexe de base pour qu'il soit éloigné à une distance constante (dans le domaine paramétrique) du centre des triangles de base adjacents. Les auteurs ajoutent une contrainte supplémentaire pour également réduire une fonction d'énergie calculée sur l'ensemble des coefficients d'ondelettes, afin d'améliorer le codage. La paramétrisation initiale est finalement modifiée en tenant compte des changements appliqués sur le complexe de base. Les triangles de base obtenus pour les modèles "Teeth" et "Venus" (présentés dans l'article) gardent alors une forme relativement uniforme, pour des taux de compression améliorés sur la majorité des modèles étudiés par rapport à NMC, grâce aussi à leur technique de compression adaptative, décrite à la section 5.2.2.

Les algorithmes de remaillage semi-réguliers décrits jusqu'à présent, construisent des surfaces possédant des artéfacts ou un aspect non lisse au niveau des frontières de patches. C'est pour répondre à ces problèmes de distorsion paramétrique qu'une nouvelle classe de paramétrisation est apparue, qualifiée de "globally smooth" (globalement lisse) pour exprimer son caractère différentiable en tout point du maillage. La paramétrisation ne s'effectue alors plus indépendamment sur chaque triangle grossier, mais tient également compte des frontières entre ces patches, grâce à des fonctions de transition. La compression des maillages ainsi que la qualité des approximations multirésolution produites dépendent fortement de ce caractère "globalement lisse" de la paramétrisation sous-jacente.

## 2.7 Méthodes récentes de paramétrisation "globally smooth"

La première méthode conçue dans ce contexte [57] (appelée GSP par la suite) utilise la même procédure de simplification que MAPS. En se servant de la paramétrisation définie dans MAPS comme point de départ, celle-ci est ensuite optimisée grâce à un processus de relaxation, afin de mieux contrôler l'aspect lisse, la qualité de la surface résultante et la distorsion. Des fonctions de transitions définies entre les patches grossiers sont alors nécessaires pour garantir la continuité globale. La compression des maillages semi-réguliers obtenus donne des résultats comparables à ceux considérant un remaillage normal et dans certains cas de meilleures performances (en terme de débit/distorsion). Un exemple de comparaison visuelle est illustré sur la figure 2.12.

La construction d'une paramétrisation globalement lisse est également considérée par Friedel *et al.* [30] pour améliorer le remaillage sous forme "normale". Pour cela, les

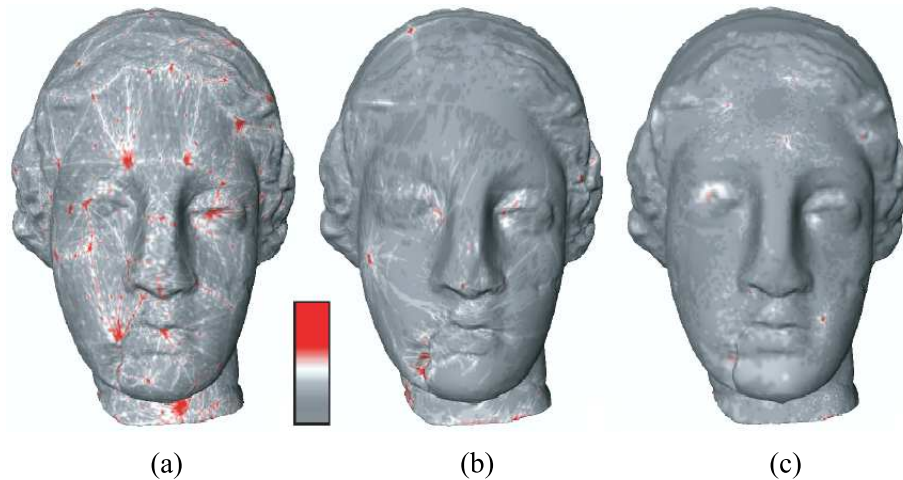


FIG. 2.12 – Comparaison des paramétrisations produites par différents algorithmes par visualisation de l'aspect lisse de la paramétrisation (gris : lisse). (a) MAPS [67], (b) NM [44] et (c) GSP [57]. Images tirées de [57].

auteurs partent d'une paramétrisation globalement lisse initiale qui est par la suite perturbée (pendant le processus de construction du maillage normal) afin de trouver un bon compromis entre une approximation où tous les coefficients sont représentés sous forme de scalaires et une version moins astreignante, produisant de plus faibles erreurs d'approximation. Cette construction se place à contre-courant des méthodes précédentes pour lesquelles la paramétrisation est produite tout au long du processus de décimation, ce qui est généralement coûteux et parfois délicat numériquement pour les grands maillages.

Il est clair que les erreurs d'approximation sont plus faibles avec la version "non astreignante", mais il est également possible de trouver explicitement un bon compromis débit/distorsion, en minimisant le nombre de coefficients non normaux. Le remaillage optimal qui n'est cette fois plus construit par interpolation, est obtenu par résolution d'un problème variationnel lié à chaque niveau de la hiérarchie. L'intérêt de ne plus contraindre l'ensemble des sommets à être répartis sur la surface originale est clairement illustré par la figure 2.13. Enfin les artéfacts produits par la version interpolante sont réduits ainsi que l'erreur d'approximation, pour un algorithme rapide, robuste et simple à mettre en oeuvre.

Les fonctions de transitions ont été également considérées par Ray *et al.* [95] pour construire une paramétrisation quasi-conforme qui ne nécessite pas de partitionnement a priori, ni de découpe. Ceci évite de trouver la partition optimale de la surface en fragments, qui est actuellement un problème ouvert. Le remaillage en quadrangles produit a l'avantage qu'il suit les lignes principales de courbure de l'objet.

Plus récemment, Guskov [39] a proposé de décomposer le maillage d'entrée en cellules de Voronoï pour obtenir le domaine de base de la même façon que Eck *et al.* [25]. Après définition d'une paramétrisation initiale (où chaque sommet est exprimé sous forme de combinaison affine), une fonctionnelle d'énergie globale permet son optimisation en vue d'une correspondance globalement lisse. L'optimisation de cette fonction

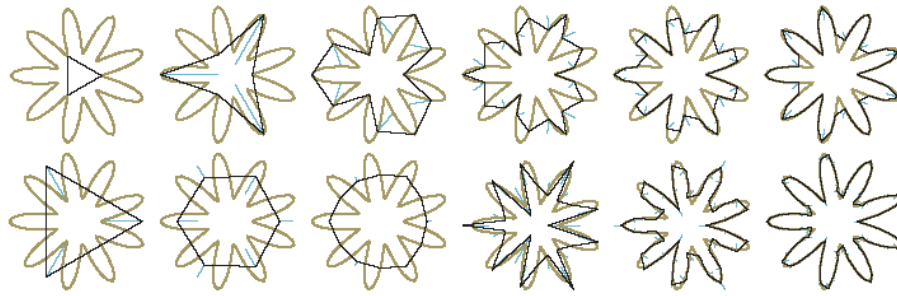


FIG. 2.13 – Schématisation 2D des erreurs d'approximation produites par des courbes "normales" interpolantes [44] (en haut) et approximantes [30] (en bas). Les deux méthodes produisent des coefficients normaux (représentés par des traits clairs), mais les erreurs liées à la méthode interpolante sont plus importantes. Images tirées de [30].

ainsi que l'étape de remaillage considèrent alors une collection de sous-ensembles ouverts couvrant le complexe de base sans entrelacement (à la différence de *GSP* [57]). L'auteur obtient des résultats comparables à *GSP* [57] en termes de performance débit/distorsion, après l'application du codeur de Khodakovsky *et al.* [58]. L'algorithme proposé est entièrement automatique, sans aucune intervention de l'utilisateur et accepte les maillages à bords. Une extension permettant de contrôler l'anisotropie du maillage de sortie procure de plus faibles erreurs d'approximation en comparaison de la version isotrope.

Une fois les maillages semi-réguliers construits, pour une erreur d'approximation convenable, tout en ayant rendu implicite une majorité de l'information topologique et paramétrique, des structures de données et algorithmes de traitement sont spécialement conçus pour se rapprocher des techniques travaillant sur des grilles régulières.

## 2.8 Analyse multirésolution et compression de ces structures semi-régulières

L'application de l'analyse multirésolution sur les maillages semi-réguliers résultant de ces derniers algorithmes est principalement destinée à la compression progressive, par l'utilisation de différents schémas de subdivision. La plupart des méthodes décrites dans cette section utilise des schémas interpolants pour que les versions simplifiées soient de bonnes approximations de l'objet original (du point de vue des moindres carrés). Autrement dit, pour que la transformation en ondelettes soit plus stable numériquement pour les applications visées.

### 2.8.1 Méthode pionnière : *PGC*

La méthode pionnière de compression progressive de maillages semi-réguliers de topologie arbitraire, appelée *PGC* et développée par Khodakovski *et al.* [58] définit un ensemble d'outils de codage à travers une transformée en ondelettes semi-régulière basée sur la subdivision de Loop [72]. En partant de ce filtre passe-bas, un filtre passe-haut miroir en quadrature respectant des critères locaux d'orthogonalité est ensuite défini. L'avantage d'utiliser des ondelettes liftées dans le cadre de cette formulation fréquentielle, est que l'analyse et la synthèse peuvent être représentés par des filtres finis. Mais

le calcul de la décomposition nécessite alors la résolution d'un système linéaire (par gradient bi-conjugué), ce qui la rend plus lente que la reconstruction. L'analyse est ainsi environ 10 fois plus lente que la synthèse, mais ceci est acceptable car l'encodage est réalisée une unique fois pour un objet.

Un repère local est utilisé pour la projection des coefficients d'ondelettes qui sont principalement dirigés suivant la normale à la surface, comme le montre la figure 2.14 tirée de [58]. Il est alors intéressant de quantifier plus finement la composante normale lors de la compression. Un codage par plans de bits rend possible la transmission des bits de poids fort des coefficients d'amplitude maximale en premier, puisqu'ils contribuent aux détails les plus importants dans la phase de reconstruction. Ce procédé permet d'obtenir à tout moment l'erreur géométrique minimale pour un débit donné. Il est alors possible, comme en compression d'images, de tenir compte du fait que les coefficients d'ondelettes obtenus décroissent au fur et à mesure que la résolution augmente, en les codant sous forme de *zerotree* grâce à une structure d'arbre basé arêtes. Ce concept hiérarchique a été exposé à la section 1.6 du chapitre précédent.

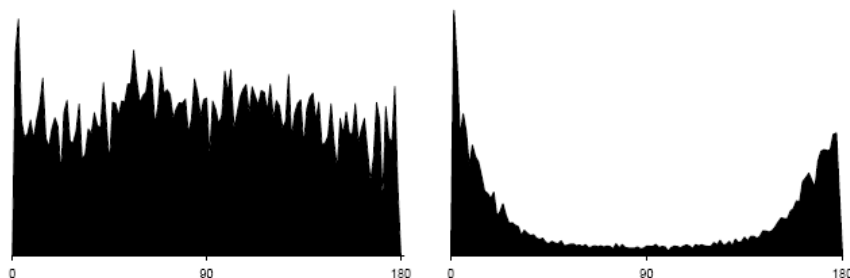


FIG. 2.14 – Histogramme de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes obtenus par la transformée de Loop utilisée dans l'algorithme de Khodakovsky *et al.* [58] pour le modèle "Venus", dans un repère global (à gauche) et local (à droite). On remarque que les coefficients sont principalement dirigés suivant la normale à la surface (correspondant à un angle polaire de 0 ou 180°). Schéma tiré de [58].

## 2.8.2 Analyse par subdivision interpolante

Les méthodes décrites ci-après sont toutes basées sur un remaillage normal, du fait de son efficacité.

### 2.8.2.1 Normal Mesh Compression (NMC)

Le premier codeur à exploiter le remaillage normal pour la compression progressive de maillages (CNM [56]) utilise un schéma Butterfly non lifté construit par "lifting scheme" et concentre la quasi-totalité de l'information géométrique dans les composantes normales des coefficients d'ondelettes. Le même type de codage des coefficients que celui de PGC est utilisé pour de meilleures performances en termes de compression aussi bien avec la transformée en ondelettes de Loop ou de Butterfly, cette dernière produisant les meilleurs résultats. Le fait que les ondelettes liftées ne donnent pas de meilleurs résultats en terme de fidélité géométrique et de compression (contrairement à ce que promet la théorie), est ici dû à la technique de remaillage normal utilisée [44]. Ceci s'explique car le remaillage normal, spécialement conçu pour produire des coefficients "scalaires", est

obtenu par une interpolation basée sur le schéma Butterfly. Ainsi les coefficients d'ondelettes ne seront plus normaux à la surface si une étape de mise à jour est ajoutée.

Cette remarque vient compléter celle de Gioia [34] à propos du fait que le comportement des ondelettes de subdivision peut être légèrement différent de ceux prévus par la théorie classique. Celle-ci stipule par exemple que le nombre de moments nuls doit être suffisamment élevé pour définir une transformée stable, or en pratique, des ondelettes de subdivision possédant un moment nul sont le plus souvent utilisées. Dans le même ordre d'idée, mais à propos de l'orthogonalité, Certain *et al.* [13] ont comparé expérimentalement la performance des ondelettes lazy et de celles obtenues par orthogonalisation avec les fonctions d'échelles situées dans le 0, 1 ou 2-voisinage (principe illustré sur la figure 2.15). De façon générale, les ondelettes lazy donnent de moins bons résultats en termes d'erreur géométrique, mais pour les autres, les résultats sont comparables. Cette remarque a d'ailleurs été confirmée par Valette dans le cadre de ses travaux [122]. De plus, les ondelettes ayant un petit support ont tendance à être plus stables numériquement que celles ayant un support plus large.

Nous venons de voir que les résultats relatifs à la compression sont fortement conditionnés par le remaillage et la transformée en ondelettes utilisés. Mais l'étape de quantification des coefficients n'est pas non plus à négliger pour améliorer encore les performances.

### 2.8.2.2 Nouvelles méthodes de compression basées sur le remaillage Normal

Lavu *et al.* [65] ont proposé en 2003 une optimisation de la technique de compression précédente, grâce à un algorithme basé sur l'estimation et la quantification (EQ) contextuelles, prévu à l'origine pour les images fixes [73]. Sachant que les coefficients d'ondelettes, même après transformation, restent tout de même localement corrélés, les auteurs proposent d'estimer leur distribution dans un contexte de voisinage local, sous forme de Gaussienne Généralisée (GGD). Chaque coefficient d'ondelette est alors considéré comme une variable aléatoire suivant une GGD de moyenne nulle et de variance variable en fonction de l'aspect surfacique (faible valeur pour région lisse). Les coefficients déjà encodés sont pris en compte pour calculer l'estimation qui pourra alors être réversible. Ce procédé permet de tenir compte lors de la quantification, du fait que les composantes normales des coefficients apportent une plus grande contribution à l'erreur de reconstruction globale, afin d'optimiser le compromis débit/distorsion. Sur certains objets, le gain obtenu est en comparaison de l'algorithme précédent est de 0.5 à 1 dB, mais le fait de devoir calculer un quantificateur pour chaque coefficient s'avère lourd d'un point de vue calculatoire.

D'autres auteurs [109, 110] basent leur optimisation sur l'arrêt du transfert de la trame binaire allouée à différents segments de la surface, à partir du moment où les plans de bits ajoutés n'apportent plus assez de détails par rapport à la qualité désirée. Cette technique prometteuse basée sur un partitionnement préalable est détaillée à la section 5.2.2 de ce document.

Enfin, Payan *et al.* [91] proposent une technique d'allocation binaire afin de contrôler les pertes et optimiser le compromis entre qualité visuelle et débit désiré. Ils cherchent ainsi à obtenir le meilleur quantificateur pour la sous-bande basse-fréquence et les sous-



bandes haute-fréquence correspondant aux coefficients de chaque niveau de résolution, afin de maximiser la reconstruction pour un débit fixé. Pour cela il est nécessaire d'estimer les dégradations visuelles provoquées par la quantification, suite à une transformation en ondelettes (Butterfly non lifté). La métrique utilisée est basée sur la distance de Hausdorff afin de ne tenir compte que de la différence géométrique, indépendamment de la topologie, vu qu'une phase de remaillage est utilisée. En effet, celle-ci exploite le fait que deux objets peuvent être visuellement identiques tout en ayant un échantillonnage différent.

Ce problème d'optimisation est alors résolu par une approche lagrangienne. Les composantes tangentielle et normale des coefficients sont quantifiés indépendamment en exploitant des modèles statistiques différents, vu que les détails sont principalement dirigés suivant la normale. Enfin une extension du codeur EBCOT [120] est proposée afin de définir des contextes spécifiquement adaptés aux maillages lors du codage par plans de bits.

Leur processus d'allocation binaire améliore les performance de la méthode CNM [56] de plus de 2.5 dB en moyenne sur les objets usuels.

### 2.8.2.3 Autre technique produisant des coefficients scalaires

Une autre façon de produire une représentation géométrique "scalaire" des maillages a été conçue par Lee *et al.* [66] pour le rendu efficace de maillages grâce à des cartes de déplacement. Cette approche représente ainsi le maillage original par un maillage de contrôle très grossier construit attentivement pour que les détails à ajouter à sa version lissée par subdivision de Loop, puissent être représentés par des déplacements normaux. Aucune hiérarchie n'est ici produite. Les déplacements scalaires sont obtenus grâce à une technique de "lancer de rayons" partant des sommets de la version lissée et se dirigeant le long de leur normale jusqu'à ce qu'ils intersectent la surface initiale. Le déplacement signé peut ainsi être calculé de ces sommets aux points d'intersection, pour produire ainsi la carte de déplacements facilitant le rendu de ces objets. Comparé aux NM, cette représentation est purement scalaire mais les complexes de base sont légèrement plus denses, même pour des modèles géométriques simples.

Enfin d'autres auteurs [7, 71] ont proposé la construction de transformées en ondelettes basées sur la transformée de Loop et le schéma lifting, pour éviter les problèmes rencontrés par la méthode pionnière de Khodakovsky [58].

## 2.8.3 Méthodes récentes basées sur la transformée de Loop

Plusieurs méthodes récentes ont enfin tenté d'exploiter le fait que les subdivisions de nature approximante produisent un aspect visuel globalement meilleur et généralement plus lisse qu'avec l'utilisation de schémas interpolants. Les auteurs ont pour cela redéfini les filtres de Loop utilisés par Khodakovski *et al.* [58] sous forme de schéma lifting afin de proposer une analyse et une synthèse en temps linéaire. Pour cela, il faut d'abord redéfinir les masques pour qu'ils deviennent des opérations de lifting. Comme nous avons à faire à un schéma approximant, la phase de prédiction est composée d'un masque de prédiction primale ( $R_i$  sur la figure 2.16) et duale ( $R_p$ ).

Bertram [7] propose ensuite d'orthogonaliser les ondelettes lazy associées, avec les quatre fonctions d'échelles situées dans un voisinage proche et visibles sur la première

image de la figure 2.15. Ceci nécessite alors la résolution d'un système de quatre équations linéaires, qu'il est possible de simplifier en utilisant un produit scalaire discret au lieu de tenir compte de la forme continue des fonctions de base. Les résultats obtenus après plusieurs niveaux d'analyse produisent des approximations stables numériquement. Pour certaines applications visées, il est nécessaire de procéder à une vérification de la stabilité, car il est bien connu que l'analyse lazy basée sur le schéma de Loop n'utilisant pas d'étape de mise à jour, produit des artéfacts sur le maillage grossier, comme le montre le schéma (a) de la figure 2.18.

Dans le même ordre d'idées, Li *et al.* [71] obtiennent de meilleurs résultats que Bertram en termes de stabilité numérique, comme le montre le schéma (c) de la figure 2.18. Ces deux méthodes sont bien adaptées pour la compression ou l'édition multirésolution de surfaces, car elles suivent la même stratégie que Lounsbery consistant à orthogonaliser partiellement les ondelettes afin d'obtenir de bonnes propriétés d'approximation  $L^2$ .

Dans la même lignée, Sauvage [105] a proposé cette fois-ci d'utiliser la phase de lifting afin d'obtenir des ondelettes d'intégrale nulle, plutôt que d'améliorer l'orthogonalité. Ceci s'explique car le but est de proposer une méthode de déformation de la surface à volume constant. Ainsi pour des raisons pratiques lors de l'édition, il est avantageux de proposer une conservation de la moyenne afin d'éviter que le maillage de contrôle ne rétrécisse ou ne grandisse à chaque étape d'analyse. Cette méthode introduit malgré tout une certaine instabilité numérique, visible sur le schéma (b) de la figure 2.18.

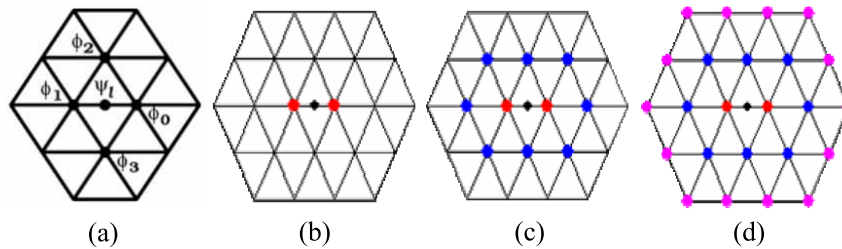


FIG. 2.15 – Illustration de la méthode d'orthogonalisation des ondelettes avec les fonctions d'échelles, pour différents voisinages autour du nouveau sommet à prédire. (a) Voisinage considéré par la méthode de Bertram [7]. Les ondelettes sont ainsi obtenues par combinaison linéaire de l'ondelette lazy  $\psi_l$  et des quatre fonctions d'échelle  $\phi_i$  ( $i = 0, \dots, 3$ ) indiquées. (b, c, d) Autres tailles de voisinage que l'on peut considérer pour "lifter" les ondelettes (disques respectifs d'ordre 0, 1 ou 2).

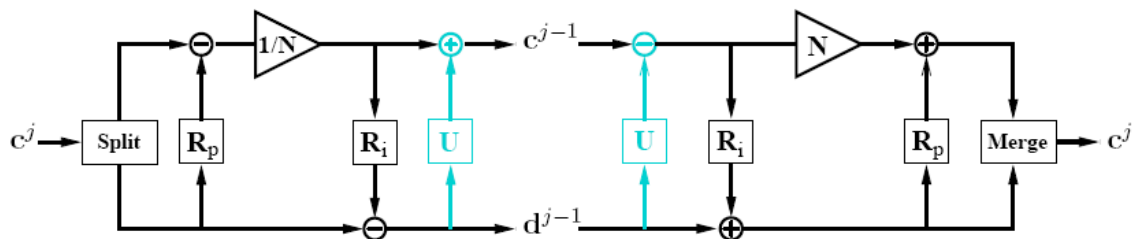


FIG. 2.16 – Diagramme d'enchaînement des étapes du schéma lifting, basé sur le filtre approximant de Loop. Deux phases de prédiction ( $R_i$  primaire et  $R_p$  duale) sont utilisées. L'analyse (à gauche) est construite par inversion du signe et de l'ordre des filtres élémentaires utilisés lors de la synthèse. Schéma tiré de [105].



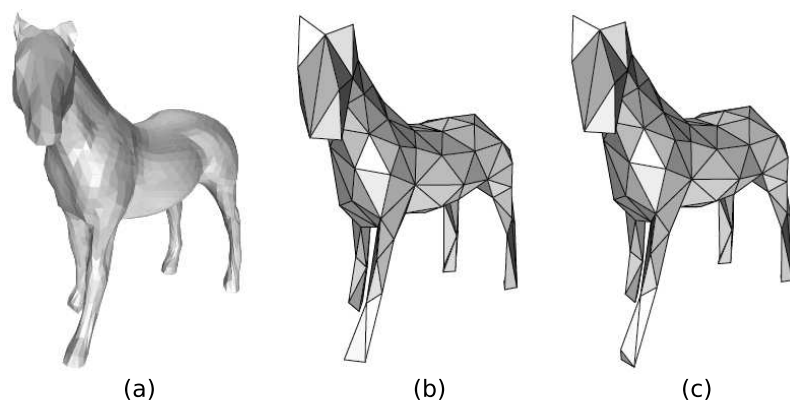


FIG. 2.17 – Simplifications du modèle "Horse" résultant de la décomposition Butterfly lifté ou non. (a) Modèle "Horse" (propriété de Caltech) obtenu au niveau de résolution 2, possédant 1762 sommets et 3520 facettes. Maillages grossiers contenant 220 facettes, résultant de l'application de deux niveaux d'analyse avec le schéma Butterfly non lifté (b) et lifté (c). Schéma tiré de [105].

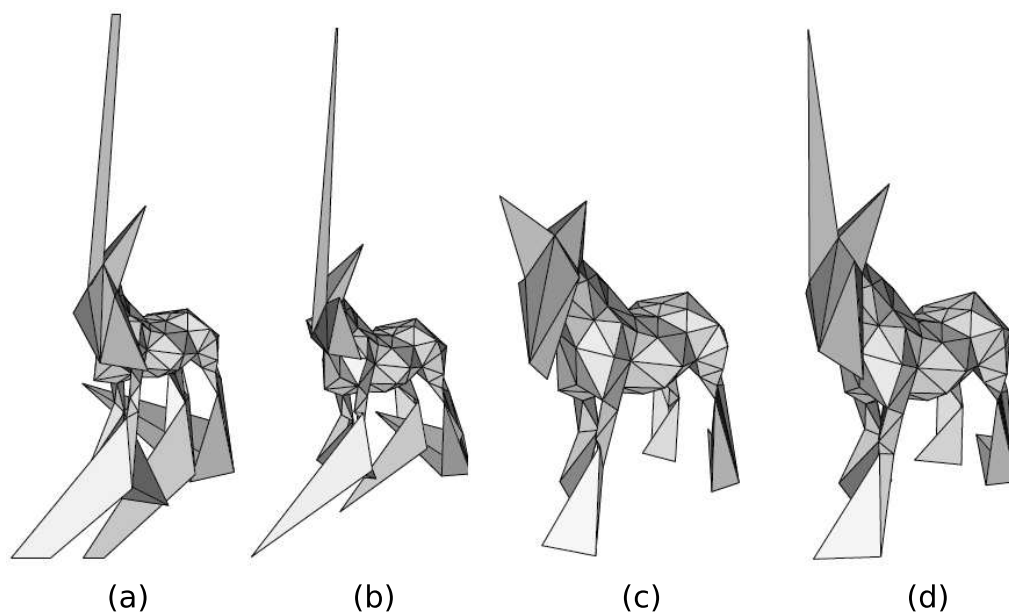


FIG. 2.18 – Maillages grossiers contenant 220 facettes, résultants de l'application de 2 niveaux d'analyse sur le maillage (a) de la figure 2.17. La décomposition utilise le schéma de Loop sans étape de mise à jour (a) et les extensions proposées par Sauvage (b), Li *et al.* (c) et Bertram (d). Schéma tiré de [105].

Pour finir, une méthode hybride de remaillage [42], combine les avantages des maillages réguliers et irréguliers. Celle-ci utilise tout de même une majorité de raffinements réguliers afin de bénéficier de structures de données et d'algorithmes de traitement efficaces. Les rares opérations irrégulières permettent de changer le genre du maillage simplifié ou de mieux approximer ses caractéristiques détaillées multi-niveaux. Pour des maillages de genre élevé, le changement de topologie de ses versions grossières garantit alors de maintenir une 2-variété sur l'ensemble des niveaux de résolution, même lorsque le maillage le plus grossier ne possède qu'une dizaine d'éléments ou moins. Les auteurs proposent enfin un algorithme de compression de ces maillages hybrides.

Nous avons présenté les principales méthodes de l'état de l'art proposant une analyse multirésolution sur des maillages surfaciques triangulaires. La majorité d'entre elles se base sur une phase de remaillage, utilisant diverses métriques lors de la paramétrisation. De plus, elles se distinguent également par le schéma de prédiction utilisé qui est soit interpolant, soit approximant. Enfin, la plupart de ces algorithmes définissent les filtres d'analyse et de synthèse grâce à la formulation introduite par Sweldens [115, 116] et définie sous le nom de "lifting scheme". Mais toutes ces méthodes traitent les maillages de façon globale, sans chercher à adapter la transformée en ondelettes aux différentes particularités des surfaces, qui peuvent être lisses par endroits, mais également très irrégulières.

C'est pourquoi nous avons développé une nouvelle méthode de compression hiérarchique s'appuyant sur une segmentation préalable de la surface en régions d'amplitudes fréquentielles variables. Les partitions résultantes peuvent ainsi être traitées indépendamment durant la décomposition en ondelettes, la quantification et le codage entropique, ce que nous exposons dans la suite de ce document. L'obtention de ces partitions est rendue possible grâce à une analyse statistique de la répartition surfacique des coefficients d'ondelettes, que nous présentons dans le chapitre suivant.



# Etude des coefficients d'ondelettes obtenus par prédiction interpolante

## 3.1 Introduction

Comme nous avons pu le voir précédemment, les surfaces de subdivision fournissent une décomposition hiérarchique des scènes et/ou objets facilitant leur indexation. Elles sont également efficaces pour une visualisation finale de qualité et possèdent un fort potentiel au niveau de la compression des modèles CAO, propriétés exploitées par Lavoué dans sa thèse [62]. Nous avons ainsi commencé par l'étude de sa méthode d'analyse développée dans le cadre du projet RNRT SEMANTIC-3D [47]. Nous avons ensuite étendu cet algorithme afin de proposer une méthode générique traitant n'importe quel objet 3D (non nécessairement lisse par morceaux) et s'adaptant à la demande de l'utilisateur. Plusieurs schémas d'analyse basés sur les ondelettes de subdivision et compatibles avec la norme MPEG-4, ont été comparés et ont donné lieu à un article dans la conférence nationale CORESA [99].

Nous avons choisi une décomposition en ondelettes basée sur le modèle d'analyse introduit par Lounsbery [75], dans sa version sous forme de "lifting scheme" [116] et considérant un objet semi-régulier en entrée. Les schémas de prédiction utilisés sont des filtres de subdivision interpolants, associés à différentes formulations d'ondelettes que nous avons cherché à comparer. Nous avons ainsi cherché la meilleure association, de manière à engendrer une répartition spatiale des coefficients sous-jacents qui traduise au mieux les variations fréquentielles sur l'ensemble de la surface. Les résultats de ces études statistiques sur les coefficients d'ondelettes (obtenus sur des maillages semi-réguliers produits par différents algorithmes de remaillage), nous ont permis de déterminer les meilleurs configurations à choisir pour envisager une segmentation "basée fréquences".

L'analyse multirésolution s'appuyant sur ces schémas interpolants a été implémentée dans notre application logicielle (développée en C++ avec la librairie CGAL [49]). Celle-ci permet alors de visualiser les différents niveaux de résolution obtenus, ainsi que la répartition des coefficients d'ondelettes associés, représentés sous forme de champs de vecteurs. Les distributions des coordonnées cartésiennes ( $x$ ,  $y$  et  $z$ ) ou sphériques ( $\rho$ ,  $\theta$  et  $\phi$ ) de ces coefficients, dans un repère global ou local, peuvent alors être visualisées directement sur la surface du maillage ou sous forme d'histogrammes.

Afin de proposer une méthode de segmentation séparant au mieux les régions lisses

Tab. 3.1 – Comparaison de la distorsion produite par différents algorithmes de remaillage sur l'objet "Rabbit".

'#  $V_{fin}$ ' = nombre de sommets du maillage fin, et '#  $V_{base}$ ' = du maillage de base après décomposition. '# niv.' = nombre de niveaux de résolution. ' $d_H$ ' = distance de Hausdorff relativement à la diagonale de la boîte englobante de l'objet (les chiffres doivent être multipliés par  $10^{-5}$ ).

	# $V_{fin}$	# niv.	# $V_{base}$	$d_H$
Rabbit irreg. 1	67 039	-	-	-
Rabbit MAPS	107 522	5	107	4,29
Rabbit NM	70 658	5	71	4,7
Rabbit NM2	179 202	5	177	3,82
Rabbit GSP	?	?	70	3,68
Rabbit irreg. 2	16 760	-	-	-
Rabbit NM	8 235	?	33	37
Rabbit GSP + INM	25 090	5	100	10,7
Rabbit GSP + VNM	25 090	5	100	6,7

des zones plus texturées, les différentes structures semi-régulières d'objets 3D usuels (obtenues par plusieurs algorithmes de remaillage existants) sont ainsi étudiées et comparées dans la suite de ce chapitre. Les comparaisons étudiées concernent à la fois le nombre et la forme des éléments issus du remaillage, l'erreur de remaillage sous-jacente, mais aussi la répartition des coefficients d'ondelettes correspondant aux différents schémas analysés (pour les modèles semi-réguliers à disposition).

### 3.2 Les différents types de remaillages considérés

Nous avons considéré trois algorithmes de remaillage qui construisent une paramétrisation continue par morceaux et basés sur une décimation séquentielle du maillage original. Ce sont les trois seuls algorithmes pour lesquels nous avons pu obtenir des objets remaillés. Il s'agit des remaillages MAPS [67], NM [44] ainsi que la variante de ce dernier algorithme proposé par Yang *et al.* [126] désigné par la suite par NM2, utilisant la même paramétrisation que celle de MAPS. Ces deux dernières méthodes cherchent à ce que les détails soient dirigés le long de la normale à la surface. Nous avons enfin considéré les résultats publiés dans des articles plus récents, afin de comparer (dans les tableaux 3.1 et 3.2) le remaillage produit par un plus grand nombre de méthodes.

Ces tableaux précisent le nombre de sommets constituant le complexe de base et le modèle remaillé, ainsi que le nombre de niveaux de résolution produits par ces différents remaillages. L'erreur de remaillage est également indiquée et correspond à la distance de Hausdorff (ou distance surface-surface) entre l'objet irrégulier original et la reconstruction considérée. Cette métrique, qui traduit la différence géométrique entre deux maillages (indépendamment de leur topologie) est expliquée de façon plus détaillée dans la partie "Abréviations", en début de document.

L'outil "Metro" [16], nous a permis de calculer cette distance sur les modèles semi-réguliers produits par les différents algorithmes de remaillage considérés, relativement à la diagonale de la boîte englobante du modèle original correspondant. L'erreur de remaillage sous-jacente, représente la limite inférieure que les algorithmes de compression peuvent atteindre sur ces structures semi-régulières. Les erreurs indiquées dans les tableaux 3.1 et 3.2 sont toutes à multiplier par  $10^{-5}$ . Un algorithme plus récent (appelé "Mesh" [3]) permet un calcul de distance similaire, mais plus rapide et flexible. Cette méthode offre en outre une représentation visuelle de l'erreur. Le fait qu'un grand nombre de méthodes actuelles utilisent encore l'outil "Metro" s'explique parce qu'elles désirent comparer leurs résultats dans les mêmes conditions que celles utilisées par les algorithmes pionniers, qui ne connaissaient que "Metro". Les distances calculées par les deux outils utilisent en effet des considérations différentes, rendant délicate la comparaison.

Nous présentons en premier lieu, les chiffres liés au remaillage de l'objet "Rabbit", que la quasi totalité des algorithmes considérés traitent. Puis nous examinons plus en détail les remaillages produits par les trois algorithmes cités précédemment, à des endroits bien caractéristiques de la surface. Pour une meilleure évaluation des tendances de ces algorithmes, les résultats du remaillage de deux autres objets sont également comparés.

Les algorithmes considérés ne partent pas toujours des mêmes modèles irréguliers. Nous avons donc regroupé ceux qu'il est possible de comparer. Les erreurs de remaillage précisées dans la partie haute du tableau 3.1 mettent bien en évidence que la méthode *GSP* [57], qui utilise une paramétrisation globalement lisse pour éliminer les artéfacts introduits par les méthodes non globales, produit une erreur plus faible. Ceci s'explique notamment par la paramétrisation de l'algorithme *GSP*, qui est relativement similaire à celle produite par une subdivision de Loop au niveau des sommets irréguliers qui délimitent les frontières de patches, comme le montre la figure 3.1. Ce rapprochement met en évidence l'aspect lisse de la paramétrisation de *GSP* au niveau des sommets irréguliers, puisque les subdivisions de nature approximante produisent un aspect visuel globalement meilleur et généralement plus lisse que l'utilisation de schémas interpolants.

Le remailleur *MAPS* [67] produit, pour l'objet "Rabbit" (tableau 3.1), une erreur plus faible qu'avec l'algorithme *NM*. Ceci s'explique tout d'abord parce que la taille des objets remaillés est légèrement différente. De plus, le fait de restreindre les détails à se diriger le long de la normale a tendance à faire augmenter l'erreur. Friedel *et al.* [30] l'avaient déjà constaté lors de leur recherche d'un compromis entre une approximation où tous les coefficients sont représentés par des scalaires et une version moins astreignante (avec un plus grand nombre de vecteurs 3D). Observons maintenant les résultats visuels de ces différents remailleurs, pour l'objet "Rabbit".

La distorsion produite par l'algorithme *NM* n'est pas très visible sur la figure 3.3 et n'est pas aussi accentuée que celle relative aux deux autres remailleurs. Néanmoins, l'image de la figure 3.5, tirée directement de l'article, montre tout de même des étirements dans la paramétrisation, au niveau de la frontière des triangles de base (frontières reportées à toutes les autres résolutions). En ce qui concerne le remailleur de Yang *et al.* [126], la figure 3.4 montre les problèmes de remaillage obtenus lorsque les triangles de



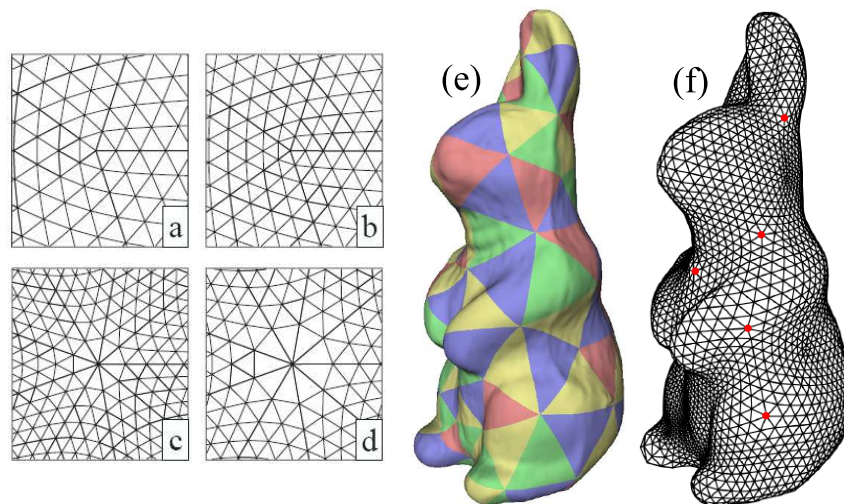


FIG. 3.1 – Comparaison des paramétrisations produites par une subdivision de Loop (a, c) et par l'algorithme *GSP* (b, d). (a-d) A proximité de sommets irréguliers de valence 5 et 9. (e, f) Remaillage de l'objet "Rabbit" où la distorsion est très peu visible, même autour des sommets irréguliers comme les sommets rouges, de degrés 7. Images tirées de [57].

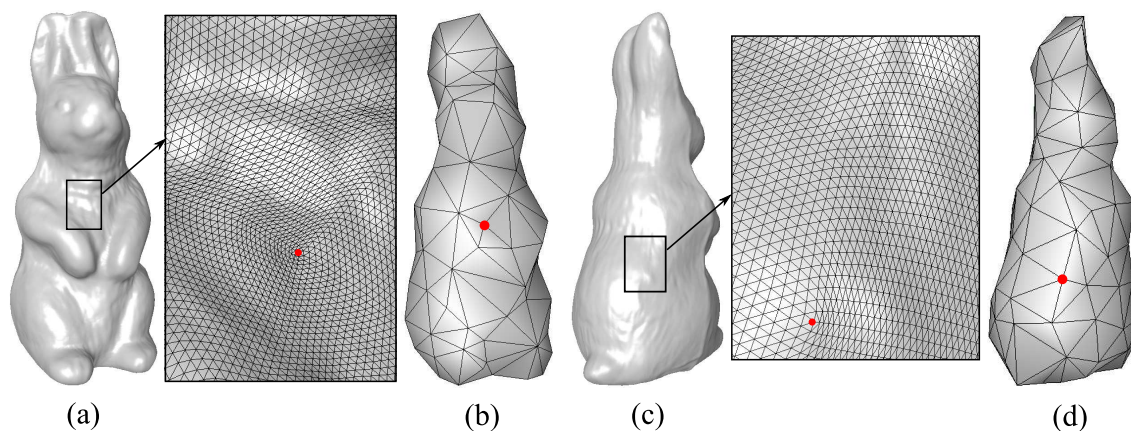


FIG. 3.2 – Zoom sur deux parties caractéristiques du modèle "Rabbit" semi-régulier (remaillé par *MAPS*) (a, c) et son complexe de base associé (b, d). Les sommets indiqués en rouge sont des sommets irréguliers pour lesquels une légère distorsion intervient (la forme des triangles n'est pas la même partout autour de ces sommets).

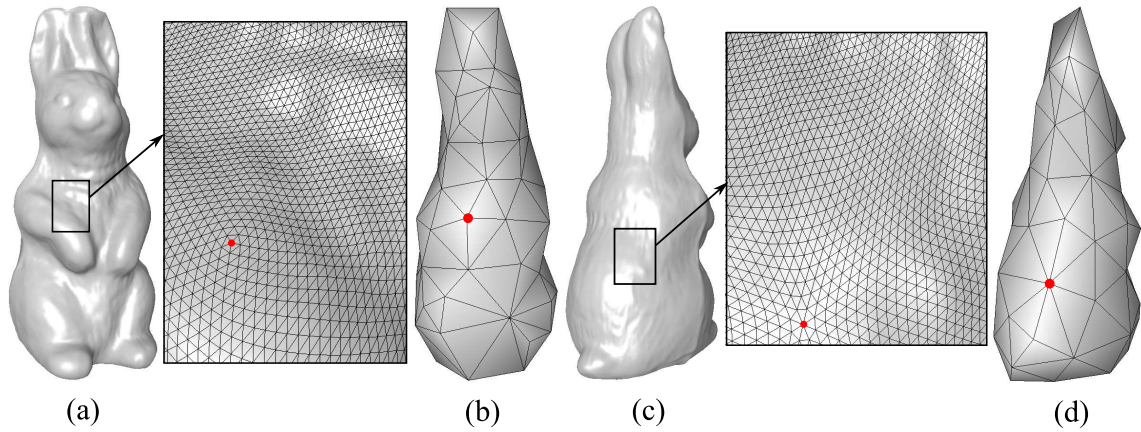


FIG. 3.3 – Zoom sur deux parties caractéristiques du modèle "Rabbit" semi-régulier, remaillé par  $NM$  (a, c) et son complexe de base associé (b, d). Les sommets indiqués en rouge sont des sommets irréguliers pour lesquels une très légère distorsion intervient (la forme des triangles n'est pas la même partout autour de ces sommets).

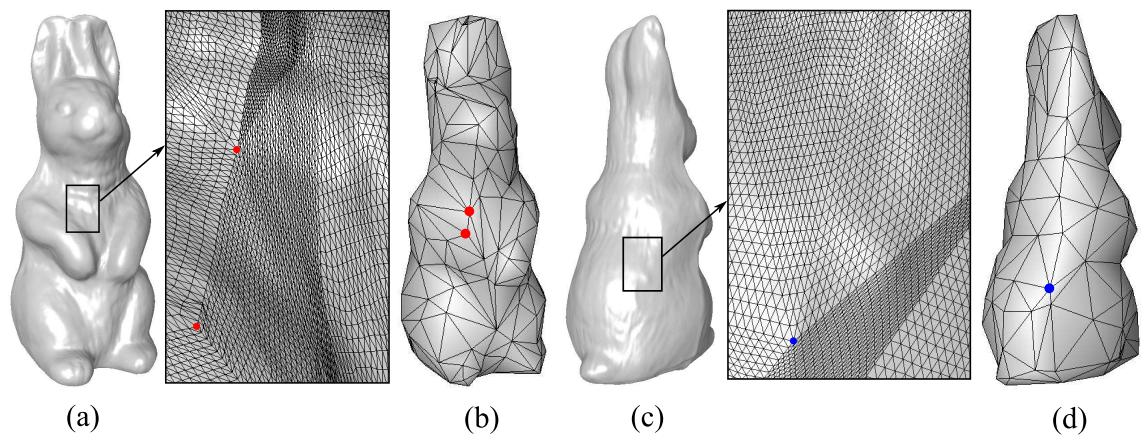


FIG. 3.4 – Zoom sur deux parties caractéristiques du modèle "Rabbit" semi-régulier (remaillé par  $NM2$ ) (a, c) et son complexe de base associé (b, d). Les sommets indiqués respectivement en bleu et rouge sont des sommets réguliers et irréguliers pour lesquels une distorsion intervient (la forme des triangles n'est pas la même partout autour de ces sommets). Ceci est dû en grande partie dans ce cas à la forme des triangles de base, qui ne sont pas toujours équilatéraux.



base ne sont pas équilatéraux. Les distorsions produites sont assez semblables à celles illustrées pour l'algorithme *MAPS* [67] par la figure 3.6, lorsque la subdivision midpoint est utilisée.

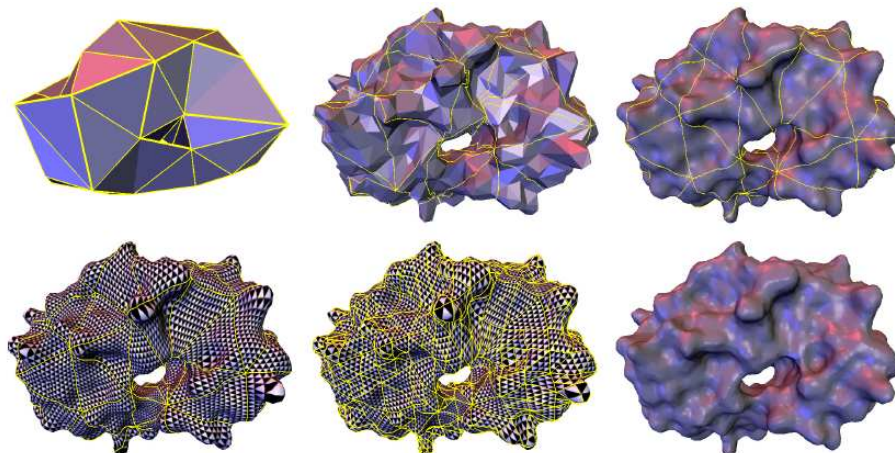


FIG. 3.5 – Grandes étapes utilisées lors de la création d'un maillage normal, pour l'objet "Molecule". Les images du haut montrent deux niveaux de raffinement obtenus à partir du complexe de base (en haut à gauche). Les images du bas représentent respectivement la paramétrisation initiale (à gauche), ajustée pour produire moins de distorsion (au centre) pour donner le remaillage final (à droite). L'ajustement de la paramétrisation permet de retirer une partie de la distorsion présente essentiellement aux frontières des patches de base. Image tirée de [44].

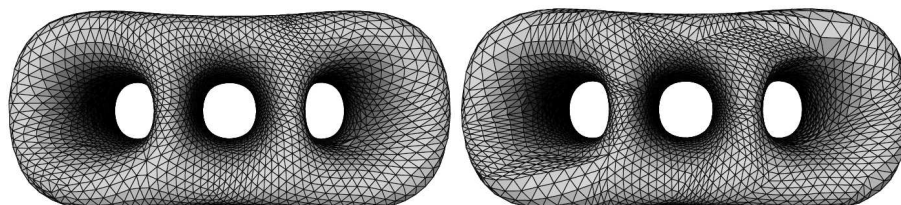


FIG. 3.6 – Comparaison du remaillage produit par l'algorithme *MAPS* avec la subdivision de Loop (à gauche) et midpoint (à droite). Image tirée de [67].

Enfin, si l'on regarde cette fois-ci le bas du tableau 3.1, on voit clairement le gain apporté par la méthode variationnelle construisant un ensemble d'approximations, comparée à la méthode classique d'interpolation. Les deux dernières lignes comparent les erreurs de remaillage obtenues en partant d'une paramétrisation de l'objet construite avec l'algorithme *GSP* [57]. Les deux méthodes sous-jacentes utilisent d'une part la subdivision interpolante de l'algorithme *NM* (*GSP + INM*) et d'autre part la méthode d'approximation variationnelle (*GSP + VNM*), pour perturber la paramétrisation initiale tout au long de la construction du maillage normal. En moyenne la subdivision interpolante augmente de plus de 60% l'erreur de remaillage (à n'importe quel niveau de résolution). Les propriétés d'anti-aliasing engendrées par la méthode variationnelle (illustrées sur la figure 3.7) expliquent notamment ce résultat.

Le tableau suivant (tableau 3.2) confirme les résultats présentés précédemment. Ainsi le remailleur *GSP* donne toujours de meilleurs résultats que ses prédécesseurs *MAPS* et

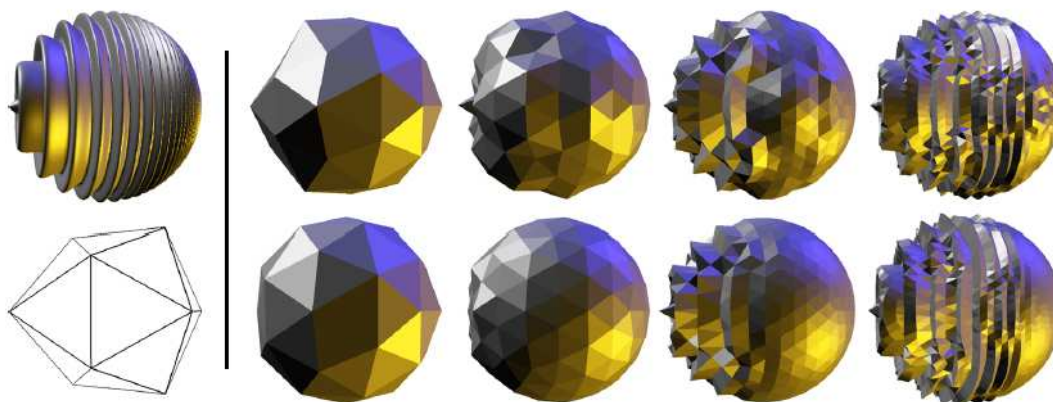


FIG. 3.7 – Comparaison de la reconstruction sur les quatre premiers niveaux d'un objet de synthèse avec les algorithmes *NM* [44] (en haut) et son extension variationnelle [30] (en bas). L'objet original considéré (en haut à gauche) est une sphère dont la surface a été perturbée par des déplacements (de fréquence croissante) le long de l'équateur. Le complexe de base (icosaèdre) est représenté en bas à gauche. Les artéfacts sont visibles au niveau de l'hémisphère droit sur les différents raffinements. Image tirée de [30].

*NM*, ce qui est confirmé visuellement par la figure 2.12, présentée au chapitre précédent et comparant visuellement sur l'objet Venus, les paramétrisations produites par les trois algorithmes.

Nous ne disposons que des objets usuels remaillés par les algorithmes *MAPS*, *NM* et seulement un nombre restreint de ceux-ci a été remaillé par l'algorithme de Yang *et al.* Pour cette dernière méthode, les paramètres utilisateur ont été laissés à leurs valeurs par défaut, ce qui produit généralement des triangles grossiers non équilatéraux et provoque une importante distorsion illustrée précédemment sur l'objet "Rabbit" (figure 3.4). Nous nous concentrons ainsi ultérieurement sur les deux premiers algorithmes, pour appliquer aux objets usuels notre décomposition en ondelettes.

### 3.3 Les différentes décompositions possibles

Notre approche d'analyse multirésolution repose sur la mise en place de plusieurs schémas de subdivision de nature interpolante qu'il est possible d'associer avec différents types de transformées en ondelettes, afin de caractériser localement les aspects surfaciques des maillages. Parmi ces schémas, nous proposons une extension du filtre interpolant de Butterfly (introduit par Dyn *et al.* [24]), légèrement différente de celle de Zorin *et al.* [129]. Ces extensions proposent des filtres spécifiques, en plus du filtre classique, afin de mieux s'adapter aux irrégularités de certains maillages. Nous présentons également différentes transformées en ondelettes utilisant ou non une étape de mise à jour.

#### 3.3.1 Schémas de prédiction considérés

Les surfaces de subdivision ont été ici retenues pour définir facilement un modèle multirésolution sous forme de schéma "lifting", afin de décomposer les filtres classiques (issus de l'analyse fréquentielle) en matrices plus simples. Cette formulation permet ainsi de déduire la phase d'analyse de la synthèse par simple inversion du signe et de

Tab. 3.2 – Comparaison de la distorsion produite par différents algorithmes de re-maillage sur les objets "Horse" et "Venus".

'#  $V_{fin}$ ' = nombre de sommets du maillage fin, et '#  $V_{base}$ ' = du maillage de base après décomposition. '# niv.' = nombre de niveaux de résolution. ' $d_H$ ' = distance de Hausdorff relativement à la diagonale de la boîte englobante de l'objet (les chiffres doivent être multipliés par  $10^{-5}$ ).

	# $V_{fin}$	# niv.	# $V_{base}$	$d_H$
Horse irreg.	48 485	-	-	-
Horse Normal	112 642	5	112	6,32
Horse Yang	179 202	5	177	6,32
Horse GSP	?	?	140	5,16
Venus irreg.	50 002	-	-	-
Venus MAPS	198 658	5	196	4,73
Venus Normal	163 842	6	42	4,41
Venus GSP	?	?	15	3,55
Horse GSP + INM	35 330	5	140	11,7
Horse GSP + VNM	35 330	5	140	8,1

l'ordre de ces matrices. De plus, nous avons vu au chapitre 1 que le "schéma lifting" engendre une amélioration des calculs lors de l'analyse et la synthèse, ce qui est non négligeable lorsque l'on traite des maillages de plusieurs milliers de sommets. Il est enfin possible, grâce à cette formulation, d'ajouter certaines propriétés aux filtres d'analyse, en fonction de l'application visée.

Les schémas de subdivision retenus consistent d'une part à ajouter un sommet au milieu de chaque arête (transformation topologique) et d'autre part à appliquer à ces nouveaux sommets un masque de lissage tenant compte du voisinage (transformation géométrique). Les coefficients d'ondelettes renferment alors les détails qui n'ont pas pu être pris en compte par la subdivision seule. Ce type de décomposition applique séquentiellement les opérations suivantes (schématisées sur la figure 3.8) :

- une opération de séparation du signal en composantes paires et impaires par l'utilisation d'ondelettes paresseuses (lazy wavelets). Pour les maillages, on utilise un schéma lifting à quatre canaux ;
- une opération de prédiction (appelée aussi lifting dual et représentée par la lettre P sur la figure 3.8) où les échantillons de rang pair (représentés en noir) servent à prédire les échantillons de rang impair (répartis en trois sous-bandes suivant l'orientation de l'arête associée) ;
- une opération de mise à jour (appelée aussi lifting primal et représentée par la lettre U sur la figure 3.8) qui permet de conserver sur une partie du signal la valeur moyenne de l'ensemble des informations. Pour cela l'ensemble des détails obtenus est utilisé pour modifier l'approximation, composée uniquement des sommets pairs.

Rappelons que les schémas interpolants sont les plus utilisés pour les maillages sur-

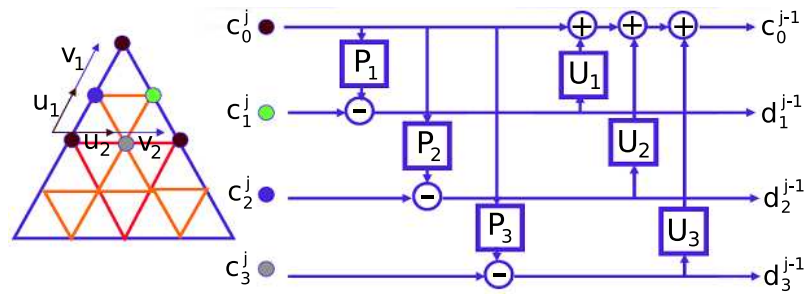


FIG. 3.8 – Schéma lifting à quatre canaux que nous avons utilisé pour l’analyse multirésolution de maillages semi-réguliers. Les étapes "P" et "U" représentent respectivement la prédiction et la mise à jour dans le schéma lifting.

faciques triangulaires, car ils génèrent des matrices d’analyse creuses, applicables en temps linéaire. Nous avons ainsi cherché à comparer la décomposition produite pour les schémas suivants :

- le schéma linéaire ou midpoint, où chaque nouveau sommet est ajouté au milieu de chaque arête (quadrisection canonique) ;
- le schéma Butterfly de Dyn *et al.* [24] produisant une surface limite  $C^1$  pour les maillages de topologie régulière. Les pondérations correspondantes sont indiquées à gauche de la figure 3.9 ;
- l’extension du schéma précédent proposée par Zorin *et al.* [129] qui ont introduit de nouveaux masques pour éviter les artefacts produits au niveau des sommets extraordinaires (décrits à la section 1.5.1 du chapitre 1 et illustrés par le schéma du milieu de la figure 3.9), tout en préservant la simplicité et le comportement du schéma original pour les sommets réguliers ;
- une extension du schéma classique de Dyn *et al.*, que nous avons mise au point en utilisant un filtre plus simple que celui de Zorin *et al.* pour traiter les sommets irréguliers. Le masque est tiré de la subdivision interpolante de Loop [72] (illustré à droite de la figure 3.9) pour le déplacement des sommets impairs ajoutés au milieu de chaque arête (partie gauche du schéma). Il permet ainsi de s’adapter facilement à tout type d’irrégularité de part son support restreint, tout en produisant une surface résultante globalement plus lisse qu’avec le schéma classique (non adapté à l’irrégularité topologique).

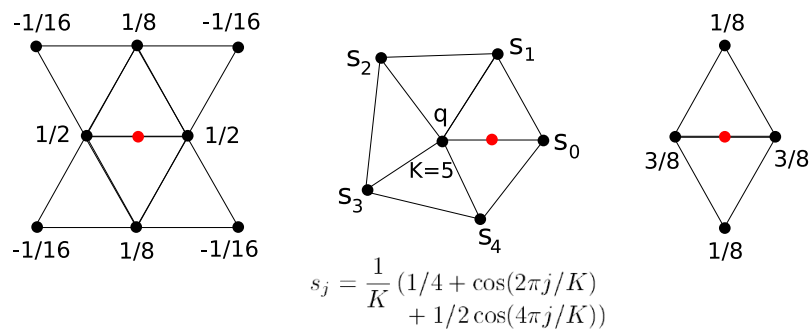


FIG. 3.9 – Masques utilisés pour la prédiction d’un nouveau sommet, dans le cas où ses deux sommets voisins sont réguliers (à gauche) ou irréguliers (au milieu : extension de Zorin *et al.* [129], à droite : notre extension).



A la différence de l'extension proposée par Zorin *et al.* [129], qui utilise des pondérations adaptées à la valence de chaque sommet extraordinaire, nous utilisons un unique masque pour l'ensemble des irrégularités rencontrées, afin d'obtenir un gain en temps d'exécution, ainsi qu'une homogénéisation du traitement des sommets irréguliers. Les figures 3.10 et 3.11 comparent la surface de subdivision résultant de l'application sur quatre itérations des trois derniers schémas sur le modèle Néfertiti. La première figure compare les résultats produits à partir de la version grossière d'origine, où certains des sommets irréguliers, de valence respectivement inférieure ou supérieure à six, sont identifiés en bleu ou en rouge. Les sommets identifiés correspondent à ceux pour lesquels notre extension produit des artéfacts locaux (sous forme de pics ou de creux). En regardant de plus près (figure 3.11), on s'aperçoit que notre extension produit globalement une surface plus lisse qu'avec la méthode classique, excepté au niveau des sommets irréguliers. Les sommets de valence inférieure à six provoquent généralement les artéfacts les plus importants. Nous comparons dans la suite la distribution des ondelettes produites par ces différents schémas.

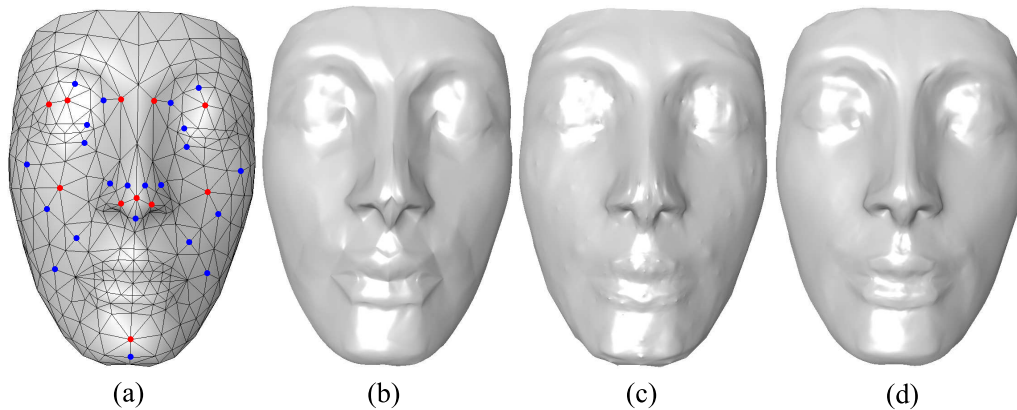


FIG. 3.10 – Comparaison du lissage du modèle Nefertiti par différentes variantes du schéma de subdivision Butterfly. (a) modèle d'origine sur lequel sont appliquées les quatre itérations des différents modèles de subdivision. Certains des sommets irréguliers de valence respectivement inférieure ou supérieure à six sont identifiés en bleu ou en rouge; (b) masque de Dyn *et al.* [24]; (c) notre extension; (d) extension de Zorin *et al.*

### 3.3.2 Transformées en ondelettes utilisées

Une fois les échantillons impairs prédits par subdivision, la différence entre cette prédiction et leur position réelle nous donne les ondelettes sous forme de vecteurs géométriques 3D. Ces vecteurs 3D peuvent être représentés dans le repère global ou dans un repère local lié à l'arête du maillage qu'ils raffinent. La plupart des méthodes de compression multirésolution utilisent le repère local pour un codage optimal des coefficients, surtout lorsqu'ils se concentrent le long de la normale. Ce repère est alors orienté de telle sorte que l'axe  $z$  soit confondu avec la normale à l'arête à laquelle est associée le coefficient, les axes  $x$  et  $y$  étant situés dans le plan perpendiculaire à  $z$ , où l'un des deux est généralement confondu avec l'arête. La figure 3.12 confirme ces affirmations, en présentant la distribution de l'angle polaire des coefficients (par rapport à l'axe  $z$  du repère considéré). Ces coefficients sont obtenus après décomposition du modèle Venus par subdivision de Loop (remaillé par MAPS [67] : histogramme de gauche et du milieu)

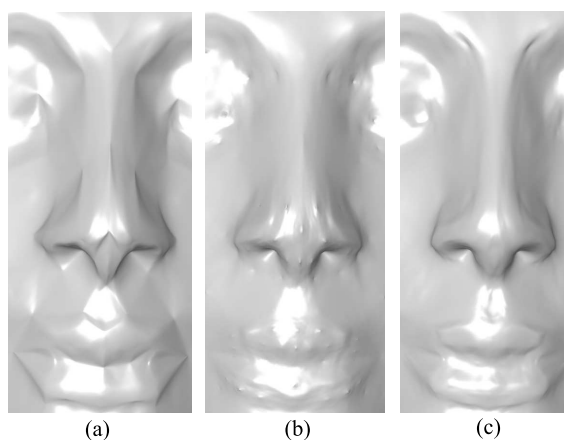


FIG. 3.11 – Zoom sur une partie du modèle Nefertiti, subdivisé par différentes variantes du masque Butterfly. Images extraites de la figure 3.10. (a) masque de Dyn *et al.* [24]; (b) notre extension; (c) extension de Zorin *et al.*

ou par subdivision Butterfly (sur un maillage "normal" [44] : à droite).

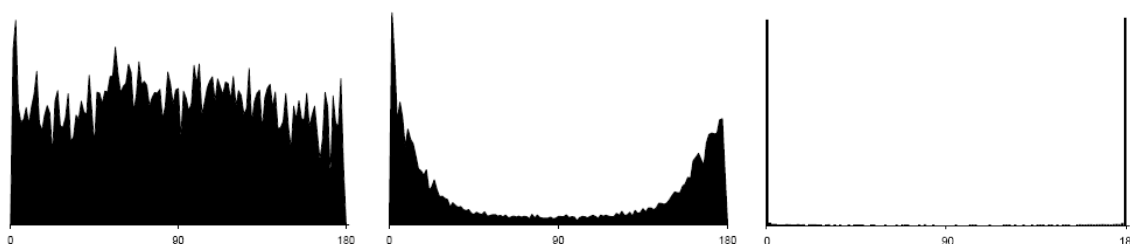


FIG. 3.12 – Distribution de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes sur l'objet "Venus" dans un repère global (à gauche) ou local (au milieu et à droite). Les coefficients sont majoritairement dirigés le long de la normale, surtout lorsqu'une subdivision Butterfly est utilisée sur un maillage "normal" [44] (histogramme de droite). Ainsi le repère local permet de les coder plus efficacement. Images tirées de PGC [58] et CNM [56].

La transformée en ondelettes de seconde génération sous-jacente peut alors être "lif-tée" ou non selon que l'on utilise l'étape de mise à jour ou non dans le schéma lifting. Comme notre but est d'obtenir les plus petits coefficients d'ondelettes possibles, nous proposons de comparer ces différentes transformées en ondelettes sur les structures à disposition (issues des remailleurs *MAPS* et *NM*). Ces fonctions d'ondelettes peuvent alors être associées à chacun des filtres décrits précédemment. Les comparaisons expérimentales envisagées sont intéressantes car il est généralement difficile de prévoir le comportement des ondelettes géométriques qui se comportent légèrement différemment de ce que prévoit la théorie classique. Nous ne considérons tout de même qu'une orthogonalisation des ondelettes avec les fonctions d'échelles sur un voisinage o-ring (illustré par le schéma (b) de la figure 2.15 du chapitre 2), au vu des résultats publiés par Certain *et al.* [13], évoqués au chapitre 1.

Pour l'algorithme de remaillage *NM*, un schéma Butterfly non lifté permet de mieux concentrer la quasi-totalité de l'information géométrique dans les composantes normales

des coefficients d'ondelettes, comme le montre la figure 3.14. Le fait que l'étape de mise à jour ne donne pas de meilleurs résultats en terme de fidélité géométrique et de codage (comme promis par la théorie), est ici dû à la technique de remaillage utilisée, comme expliqué au chapitre précédent.

### 3.3.3 Résultats expérimentaux

L'ensemble des décompositions précédemment détaillées ont été implémentées dans notre application logicielle. Celle-ci permet de visualiser, pour chaque niveau de résolution, l'approximation obtenue, ainsi que l'amplitude et la direction des coefficients d'ondelettes sous forme de champs de vecteurs. Il est ainsi possible de comparer visuellement les vecteurs 3D ou leur distribution reflétée par les histogrammes des coordonnées issues de la projection dans un repère global ou local. Nous insisterons également sur leurs corrélations inter et intra résolution (même après transformation), qu'ont exploité certains algorithmes de codage détaillés au dernier chapitre.

#### 3.3.3.1 Visualisation des ondelettes sous forme de vecteurs 3D

Etant donné que nous nous basons sur deux algorithmes différents de remaillage semi-régulier, nous avons d'abord voulu montrer la différence de répartition des coefficients d'ondelettes, à l'aide de plusieurs formes de représentation. Rappelons que chaque coefficient d'ondelette est rattaché au milieu de l'arête grossière qu'il raffine. Le vecteur 3D correspondant doit plus précisément être ajouté une fois que les étapes de quadrisection canonique et de subdivision ont été appliquées. Ainsi la prédiction correspond exactement au milieu de l'arête dans le cas d'une subdivision linéaire uniquement, mais cette notation est celle couramment utilisée.

La première figure présentée (figure 3.13) justifie bien le fait que les coefficients d'ondelettes obtenus par simple prédiction linéaire (midpoint) ont une amplitude plus élevée qu'avec une technique prenant en compte un plus large voisinage, comme le schéma Butterfly, surtout au niveau des zones lisses de l'objet. Ceci s'explique par le fait que les surfaces de subdivision engendrent des surfaces limites lisses. Si l'on compare maintenant avec les décompositions produites par la subdivision Butterfly non liftée (figure 3.14), sur le même maillage, mais remaillé par l'algorithme NM, on voit clairement que les ondelettes sont quasiment toutes orientées le long de la normale (projection "normale" des coefficients représentée en orange). Si pour certaines ondelettes on n'aperçoit pas, sur les images, le coefficient en bleu, c'est qu'il se confond avec sa projection "normale".

On remarque enfin que les coefficients d'amplitude maximale sont situés au niveau des arêtes vives (sur le cou) et des détails haute-fréquence (yeux, nez, chevelure). On observe aussi que leur amplitude diminue au fur et à mesure que la surface devient lisse. Il est ainsi possible d'utiliser ces informations afin de procéder à une segmentation de l'objet en patches surfaciques d'aspect plus ou moins rugueux. Cette segmentation, détaillée au chapitre suivant, permettrait alors de procéder à une décomposition en ondelettes adaptative, suivie d'une quantification spécifique pour chaque patch, afin d'obtenir une chaîne de compression locale. Ce "framework" d'analyse multirésolution adaptative est exposé au dernier chapitre.

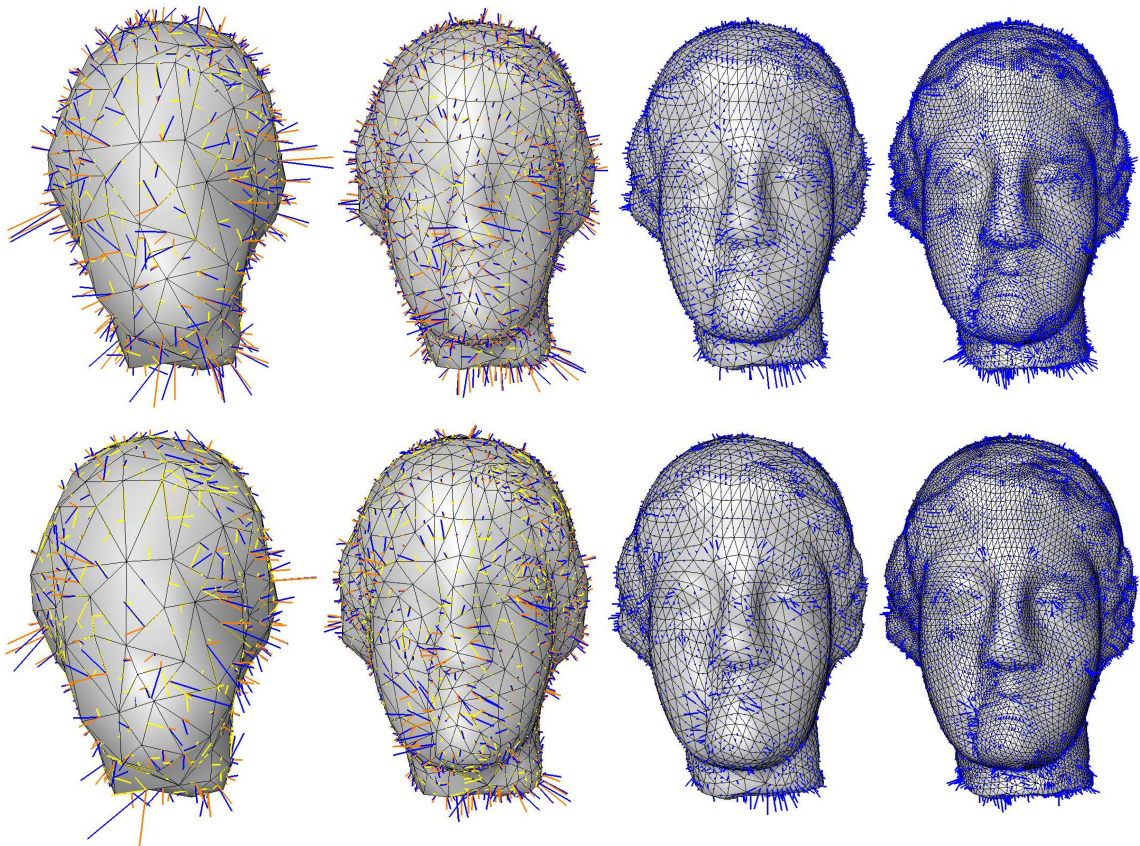


FIG. 3.13 – De gauche à droite : répartition spatiale des ondelettes (en bleu) et de leur projection dans un repère local, sur les quatre premiers niveaux de décomposition de l'objet "Venus" remaillé par *MAPS*. La décomposition de la ligne du haut utilise la subdivision midpoint, tandis que les ondelettes du bas ont été obtenues par prédiction Butterfly. La projection des coefficients dans le repère local se décompose en composantes tangentielle (en jaune) et normale (en orange).

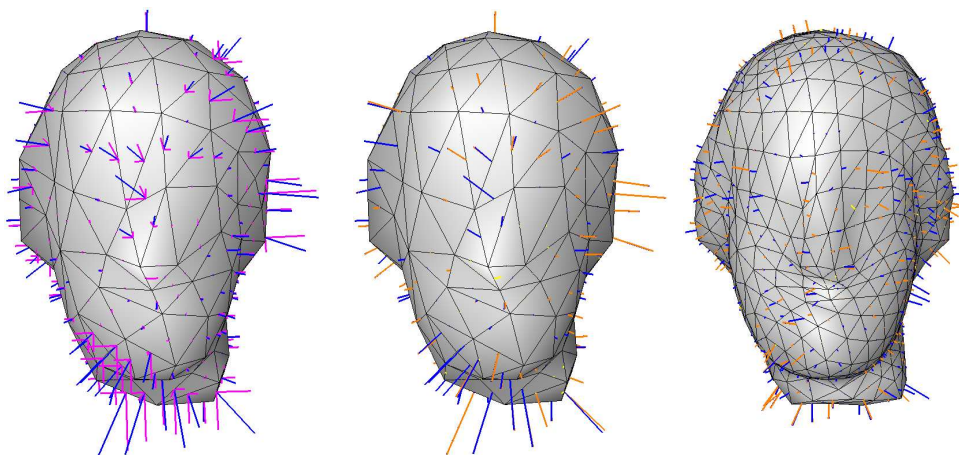


FIG. 3.14 – Répartition spatiale des ondelettes (en bleu) et de leurs coordonnées dans deux repères différents, sur les deux premiers niveaux de décomposition de l'objet "Venus" remaillé par *NM*. Le schéma Butterfly non lifté a été considéré ici. La projection des coefficients dans le repère global est représentée en rose, tandis que celle dans le repère local se décompose en composantes tangentielle (en jaune) et normale (en orange).



Lors de l'énonciation des méthodes de l'état de l'art (au chapitre précédent), nous avons précisé que les ondelettes sous-jacentes à une subdivision Butterfly non liftée sur un maillage "normal", engendraient les meilleurs taux de compression. C'est la raison pour laquelle, les exemples présentés dans la suite de ce chapitre, se basent principalement sur cette configuration, excepté dans la dernière section (section 3.5) où nous illustrons les distributions des coefficients obtenus à partir de n'importe quel objet remaillé.

### 3.3.3.2 Distribution des coefficients dans les repères global et local

La figure 3.15 illustre la distribution des coordonnées des coefficients d'ondelettes, obtenues dans un repère global ou local sur l'objet "Venus" remaillé par NM. Les histogrammes du haut reflètent la distribution des coefficients rattachés à l'approximation la plus grossière (niveau de résolution 0), tandis que ceux du bas considèrent la troisième approximation (niveau 2), ayant plus de coefficients.

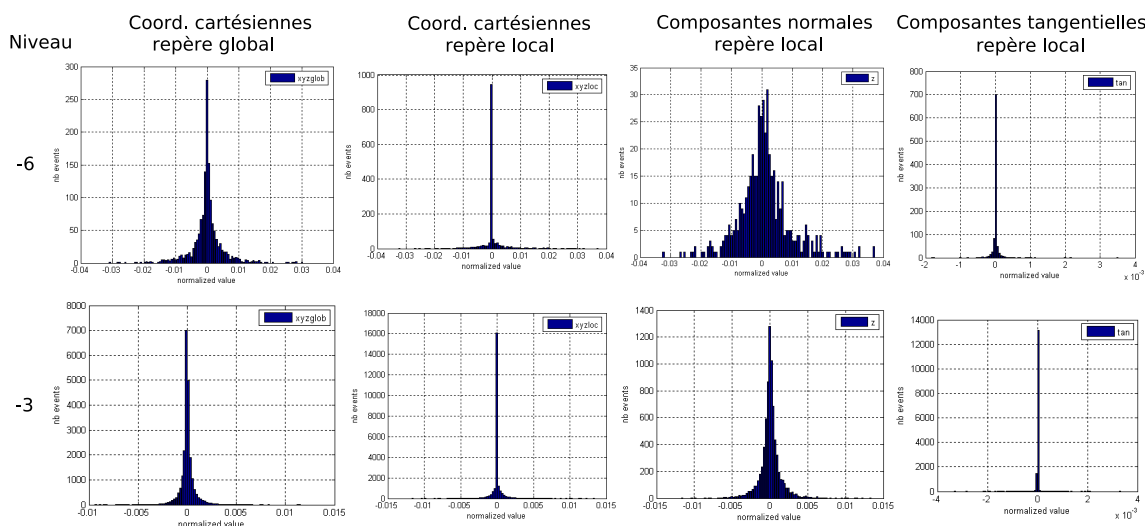


FIG. 3.15 – Distributions des coordonnées des coefficients d'ondelettes, obtenues dans un repère global ou local sur l'objet "Venus" remaillé par NM. Les ondelettes considérées dans la ligne du haut sont rattachées à l'approximation la plus grossière, tandis que celles du bas sont liées au troisième niveau d'approximation. Les deux premières colonnes comparent respectivement les coordonnées des coefficients dans le repère global puis local. Les deux dernières présentent la répartition des coordonnées locales (composantes normale et tangentielles).

Les deux premières colonnes de la figure 3.15, montrent premièrement que le codage dans un repère local permet d'obtenir une plus grande concentration des coordonnées autour de zéro. L'analyse des deux dernières colonnes illustre enfin que les composantes tangentielles et normales n'ont pas la même dynamique. En effet, la plupart de l'information pertinente se trouve dans les sous-bandes normales, pour ce type de remaillage. Cette affirmation est d'ailleurs confirmée visuellement sur la figure 3.14. C'est la raison pour laquelle plusieurs méthodes qui ont cherché à optimiser la quantification des coefficients, ont utilisé des modèles statistiques différents pour ces deux types de composantes. Il est ainsi intéressant de quantifier plus finement la composante normale lors de la compression.

### 3.3.3.3 Résultat d'une reconstruction partielle

Une fois l'analyse multirésolution réalisée, un fichier contenant d'une part la géométrie et la topologie du maillage le plus grossier et d'autre part les coefficients d'ondelettes représentant les détails perdus lors des approximations successives, est généré. Au décodage, il peut être intéressant de visualiser la reconstruction intermédiaire produite lorsque seulement une partie du flux a été transmise au client. Les courbes de la figure 3.16 indiquent la distorsion produite lors de la reconstruction à un certain débit donné (en bits/sommet irrégulier, puisque l'on compare l'objet semi-régulier reconstruit au modèle original irrégulier).

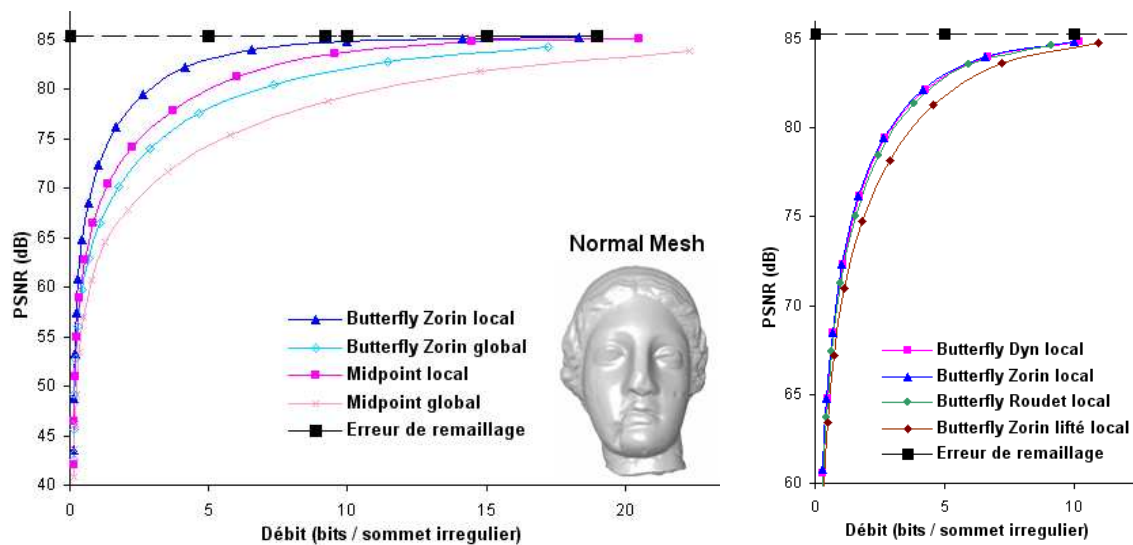


FIG. 3.16 – Comparaison des courbes débit/distorsion produites par deux schémas de subdivision différents où les ondelettes associées sont projetées dans un repère global ou local. L'objet analysé ("Venus" remaillé par NM) a été décomposé sur 5 niveaux.

La distorsion est généralement évaluée grâce au  $PSNR$ , exprimé en décibels (dB) et dont la formule est donnée en début de manuscrit, dans la partie Abréviations.

Les quatre courbes du graphe de gauche correspondent à l'utilisation de deux schémas de subdivision différents où les ondelettes associées sont projetées dans un repère global ou local. On remarque nettement que le repère local apporte de meilleurs résultats pour les deux schémas considérés. De plus, les reconstructions partielles produites à l'aide de la subdivision Butterfly non liftée sont de meilleure qualité, comparées à celles produites par la subdivision linéaire. Ceci est d'ailleurs confirmé par la figure 3.17 qui illustre la différence de reconstruction de l'objet "Venus", lorsque l'on considère les schémas et repères qui produisent respectivement, le moins et le plus de distorsion sur la figure précédente, et ce pour certains débits choisis et précisés. Les approximations engendrées par la prédiction utilisant le schéma Butterfly sont visuellement plus satisfaisantes, car la surface se trouve lissée partout.

Le graphe de droite de la figure 3.16 compare les courbes débit/distorsion sur une plage plus restreinte, résultant de la subdivision Butterfly de Dyn *et al.* ainsi que des deux extensions considérées à la section 3.3.1. Ces trois courbes sont quasiment su-

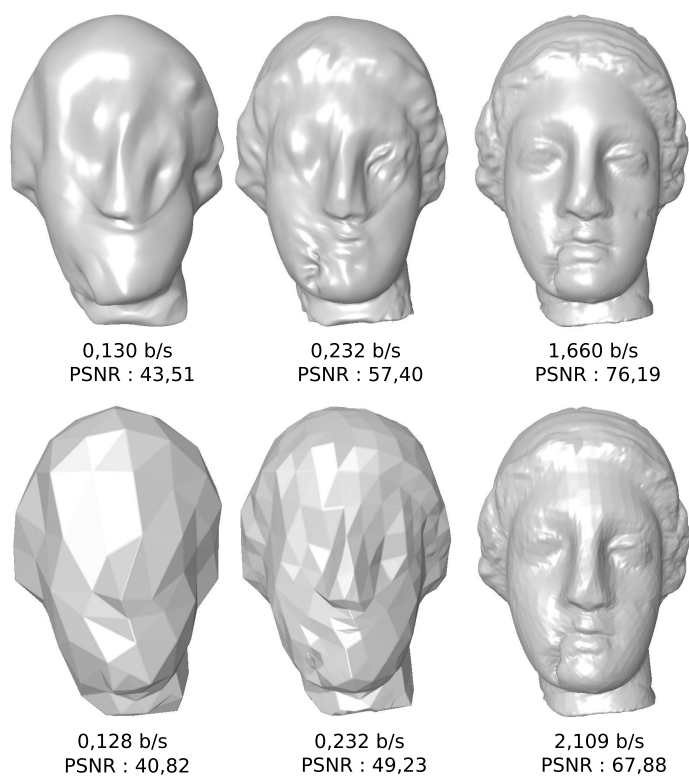


FIG. 3.17 – Approximations du modèle "Venus" remaillé par NM à différents débits, en considérant la meilleure (en haut) et la pire (en bas) courbe de la figure 3.16. Dans chaque colonne, un débit semblable est considéré.

perposées, puisque le nombre de sommets irréguliers (n'apparaissant qu'au niveau de résolution le plus grossier) est très faible en comparaison du nombre total de sommets. Ainsi les variations produites par ces différents schémas sont très peu perceptibles. A l'inverse, le fait d'utiliser une étape de mise à jour dans le schéma lifting amène, comme attendu, à de moins bons résultats du fait de la spécificité du remaillage considéré.

Nous présentons enfin sur la figure 3.18, différentes approximations obtenues lorsque les ondelettes d'un des niveaux de résolution ne sont pas considérées au décodage. Ainsi seule la subdivision considérée à l'analyse permet de construire l'approximation à ce niveau. Ce cas de figure pourrait se produire si la partie du fichier correspondant était corrompue lors du transfert des données du serveur vers le client. On remarque sur la ligne du haut que les ondelettes (en bleu) ont des amplitudes plus importantes aux résolutions les plus grossières, pour devenir quasiment indiscernables sur la figure lorsque la résolution augmente. A savoir qu'aucun facteur multiplicatif n'a été considéré dans ce cas précis, contrairement aux figures 3.13 et 3.14.

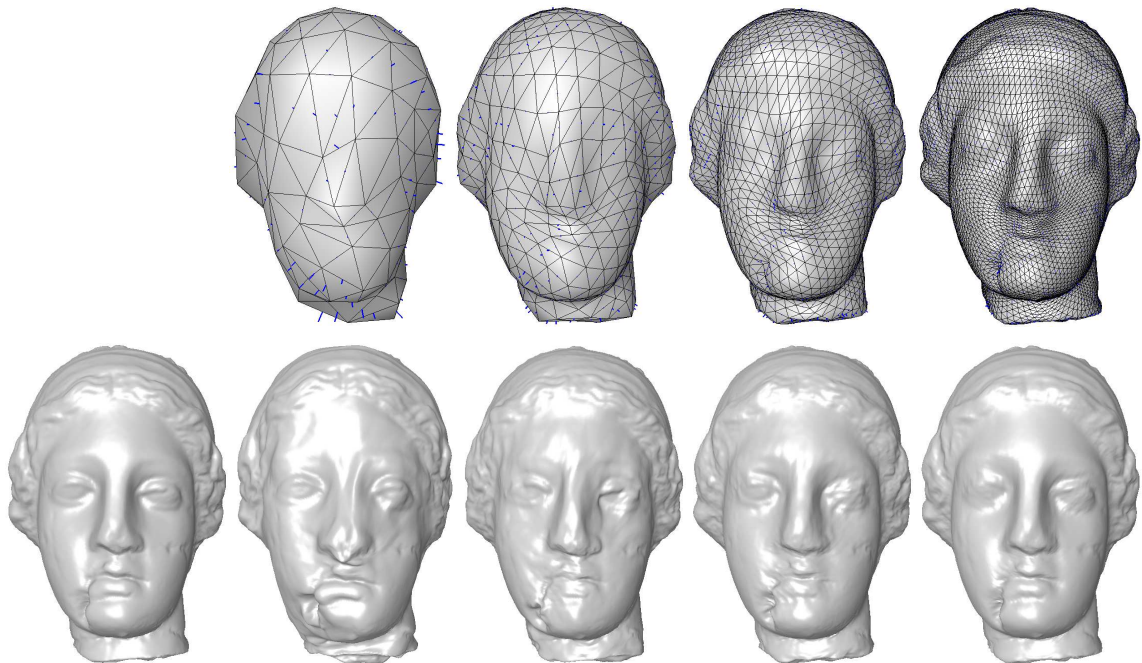


FIG. 3.18 – Reconstructions de l'objet "Venus" remaillé par NM lorsque les ondelettes d'un des niveaux de résolution ne sont pas considérées. La ligne du bas montre de gauche à droite, l'objet original puis les approximations obtenues lorsque les ondelettes associées aux niveaux de moins en moins grossiers sont omises. La ligne du haut reprecise en bleu (pour chaque approximation) les ondelettes omises correspondantes.

Ainsi la reconstruction est d'autant plus altérée en terme d'erreur géométrique si un niveau grossier est omis, comme le confirme le tableau 3.3. Dans ce tableau, les erreurs de reconstruction ont été calculées avec l'outil "Mesh" [3], en comparaison de l'objet semi-régulier, relativement à la diagonale de sa boîte englobante. Ces résultats pourraient sembler étonnants puisqu'un plus grand nombre d'ondelettes interviennent aux niveaux les plus fins, mais leur amplitude étant très faible, l'erreur de reconstruction est alors moins importante que lorsque les ondelettes d'un niveau plus grossier sont

TAB. 3.3 – Comparaison de la taille comprimée et de l'erreur produite  $d_H$  (distance de Hausdorff) lorsqu'on élimine les coefficients d'ondelettes sur certains niveaux de résolution de l'objet "Venus".

	niv 0	niv 1	niv 2	niv3	niv 4
taille (octets)	68 423	39 800	35 723	27 589	30 248
$d_H (*10^{-3})$	4,67	1,60	0,74	0,255	0,0639

omises. C'est entre autre pour cela que les codeurs zerotree envoient les informations par amplitude croissante, afin de produire à tout moment les meilleures approximations.

Contrairement à cela, Sorkine *et al.* [111] ont montré qu'une quantification plus grossière des coefficients spectraux basse-fréquence engendrait un meilleur résultat visuel. En effet, cela produit une déformation globale de l'objet, mais conserve les informations haute-fréquence, correspondant aux détails auxquels l'oeil est sensible. Leur résultat visuel est clairement meilleur, comparé à celui obtenu par quantification des coordonnées cartésiennes en utilisant la méthode TMC de Touma et Gotsman [121]), pour le même nombre de bits par sommets, même si l'erreur reste importante, du fait de la déformation. C'est pour cela qu'ils proposent une nouvelle métrique visuelle qui contrôle à la fois la déformation géométrique et le lissage de l'objet pour s'adapter à la sensibilité de l'oeil humain. Grâce à cette métrique, introduite par Karni et Gotsman [53], la quantification citée précédemment donne des erreurs de reconstruction plus faibles qu'avec la quantification des coordonnées cartésiennes.

Cette métrique, pourtant très efficace, ne s'applique que si la topologie n'est pas modifiée pendant le codage (calculs sommet à sommet). Ainsi nous ne pouvons l'utiliser que lors de la comparaison d'une approximation avec l'objet semi-régulier, comme dans le cas précédent. Les affirmations antérieures concernant la quantification sont confirmées par les méthodes de tatouage robuste sur des maillages multirésolution. Ces méthodes appliquent ainsi les marques (modifications) sur les basses résolutions afin de ne déformer que globalement le maillage et de ne conserver que les détails haute-fréquence auxquels l'oeil est sensible.

### 3.4 Expression de la rugosité par les coefficients d'ondelettes

Nous proposons maintenant d'étudier plus précisément la distribution spatiale des coefficients d'ondelettes, soit dans tous les niveaux de résolution, soit seulement dans certains en particulier, afin d'identifier des régions homogènes au regard de la hiérarchie complète. Plus précisément, nous nous intéressons à l'amplitude et l'angle polaire des coefficients, mesures que tous les algorithmes existants tentent de minimiser grâce à l'utilisation d'un même filtre sur toute la surface. Afin de comparer les différentes distributions étudiées et de baser par la suite l'algorithme de classification (K-Means) que nous avons considéré sur l'ensemble des mesures considérées, nous présentons les résultats sous forme normalisée, pour obtenir des valeurs comprises entre 0 et 1.

### 3.4.1 Mesures considérées : amplitude et angle polaire des coefficients

La distribution de l'amplitude révèle que les surfaces de subdivision produisent une bonne prédiction dans les régions homogènes lisses, du fait de leur faculté intrinsèque à générer des surfaces résultantes lisses. Mais dans les exemples considérés et de façon générale, il reste des zones dans le maillage pour lesquelles une autre prédiction pourrait produire de plus petits coefficients, en prenant en compte, par exemple, l'anisotropie de la surface, considéré par Guskov pour améliorer la paramétrisation et le remaillage semi-régulier [39]. Il s'en sert également pour mieux compresser des séquences de maillages [41].

L'angle polaire d'un coefficient d'ondelettes est l'angle qu'il forme avec le vecteur normal à la surface. Nous avons préalablement précisé que les coefficients sont rattachés à l'arête grossière qu'ils raffinent, ainsi la normale considérée est celle associée à cette arête définie comme étant la moyenne des normales aux deux facettes incidentes. Deux mesures différentes ont été considérées, selon si l'on restreint cet angle à se situer dans l'intervalle  $[0, \pi/2]$  ou dans un intervalle plus étendu allant jusqu'à  $\pi$  rad. Ces deux possibilités sont illustrées par la figure 3.19. Avec le premier intervalle, les ondelettes de même direction et de sens opposé ne sont pas différenciées. Nous n'avons pas jugé nécessaire de différencier les ondelettes symétriques par rapport à l'axe de la normale.

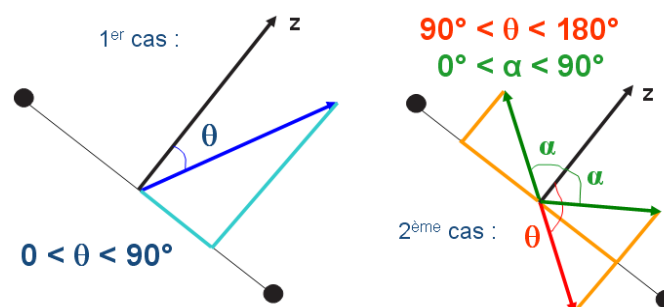


FIG. 3.19 – Deux considérations possibles pour exprimer l'angle polaire des coefficients d'ondelettes, dans l'intervalle  $[0, \pi/2]$  ou  $[0, \pi]$ . Le premier intervalle permet de ne pas différencier deux vecteurs de même direction mais de sens différent, sachant que deux coefficients symétriques par rapport à l'axe de la normale sont considérés d'angle polaire égal.

Nous présentons plusieurs distributions normalisées (entre 0 et 1) de l'amplitude des ondelettes engendrées par les schémas comparés précédemment. Étant donné que les coefficients d'ondelettes sont rattachés aux arêtes des différentes approximations, il est possible de représenter les distributions considérées directement sur les arêtes, ou de calculer les moyennes sur les sommets ou les facettes. Pour les moyennes, nous avons toujours considéré le minimum et le maximum des valeurs liées aux arêtes, car le fait de considérer les extrema des moyennes ne change pas de façon significative les résultats. Ceci explique que l'intervalle de certains histogrammes présentés n'est pas toujours compris entre 0 et 1.

L'échelle de couleurs utilisée, présentée sur la figure 3.20, permet de représenter ces valeurs en les faisant varier du bleu (0) au rouge (1). Nous avons d'abord étudié la dis-



tribution de l'amplitude et de l'angle polaire sur le premier niveau de décomposition du modèle "Venus" remaillé par NM. Ce premier niveau d'approximation est considéré comme le plus représentatif puisqu'il est associé au plus grand nombre de coefficients relativement à l'ensemble de la hiérarchie. Nous verrons à la section 3.4.3 comment considérer l'ensemble des niveaux de la hiérarchie.

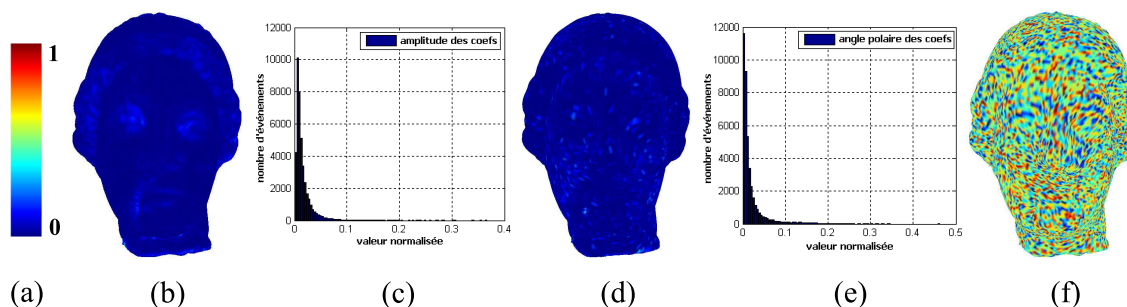


FIG. 3.20 – Répartition de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes sur le premier niveau de décomposition de l'objet "Venus" remaillé par NM. (a) Echelle de couleur utilisée. Distribution moyennée sur les sommets de l'amplitude (b, c) et de l'angle polaire dans les intervalles  $[0, \pi/2]$  (d, e) et  $[0, \pi]$  (f).

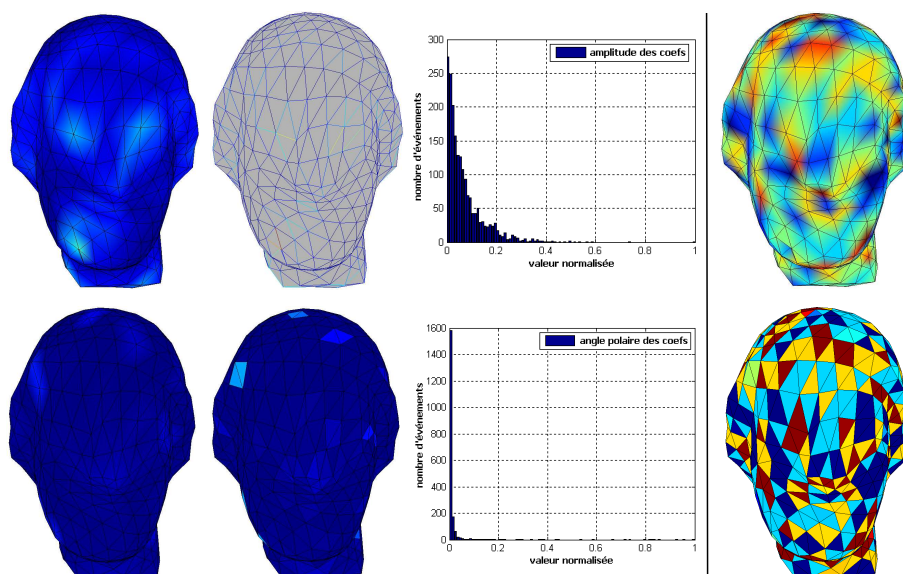


FIG. 3.21 – Répartition de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes sur le quatrième niveau de décomposition de l'objet "Venus" remaillé par NM. A gauche : distribution de l'amplitude (en haut) et de l'angle polaire dans l'intervalle  $[0, \pi/2]$  (en bas) où les histogrammes illustrent la distribution des mesures attachées aux arêtes, tandis que les répartitions spatiales présentent les trois représentations possibles (sur les arêtes, sommets ou faces). A droite : distribution de l'angle polaire dans l'intervalle  $[0, \pi]$ .

Etant donné que les mesures étudiées possèdent certaines valeurs extrêmes très peu représentées (surtout celles proches de 1), nous avons décidé de restreindre l'intervalle des mesures considérées, afin d'obtenir une répartition plus significative et exploitable par l'algorithme de classification. Nous expliquons le procédé mis en place à la section suivante.

### 3.4.2 Restriction des intervalles considérés

Une normalisation Gaussienne est utile pour éliminer les extrema, engendrant de meilleurs résultats pour la classification, puisque cela permet alors de se focaliser sur les valeurs les plus représentées. La création de cet intervalle de confiance est alors possible si les histogrammes associés ont une distribution normale (en forme de cloche). Si cette supposition est vérifiée, et qu'on connaît la moyenne  $\bar{x}$  et l'écart-type  $\sigma$ , alors :

- Dans l'intervalle  $[\bar{x} - \sigma; \bar{x} + \sigma]$ , on trouve 68% de la population.
- Dans l'intervalle  $[\bar{x} - 2\sigma; \bar{x} + 2\sigma]$ , on trouve 95% de la population.
- Dans l'intervalle  $[\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma]$ , on trouve 99,7% de la population.

On appelle ces intervalles les plages de normalité à niveau de confiance de 68%, 95%, 99,7%. Nous avons toujours considéré le deuxième intervalle listé ci-dessus pour nos traitements car cela nous a donné de suffisamment bons résultats sans une restriction plus importante qui pourrait fausser ceux-ci. Les résultats utilisant ces restrictions d'intervalles sont illustrés sur les objets usuels à la dernière section de ce chapitre.

### 3.4.3 agrégation de toutes les ondelettes de la hiérarchie

Les distributions présentées précédemment ne prennent en compte que les ondelettes associées à un seul niveau de résolution, ce qui ne permet pas toujours de bien identifier toutes les caractéristiques surfaciques haute-fréquence des maillages, généralement réparties sur différents niveaux. En contrepartie, l'ensemble des ondelettes de la hiérarchie renferme tous les détails que la simple subdivision n'a pas permis de prédire correctement. Sachant qu'habituellement les objets sont analysés sur cinq niveaux de résolution et que leur amplitude est généralement plus élevée dans les niveaux grossiers, il serait intéressant d'en tenir compte dans le calcul de la répartition des mesures étudiées. Sachant que notre algorithme de classification qui exploite ces mesures, n'est capable de traiter qu'un maillage à la fois, la solution la plus simple est d'effectuer une moyenne des valeurs sur l'ensemble des niveaux de résolution et de reporter cette moyenne sur une des approximations.

Calculer la moyenne  $M$  des valeurs sur l'ensemble des coefficients, puis représenter  $M$  sur un des maillages d'approximation apporte les deux avantages suivants : premièrement les caractéristiques surfaciques des objets sont mieux mises en valeur qu'en ne considérant seulement les ondelettes d'un niveau de résolution, même s'il s'agit de la première décomposition, contenant le maximum d'ondelettes. De plus, le moyennage a tendance à supprimer les détails qui apparaissent uniquement à un niveau et qui ne sont pas révélateurs de la forme globale de l'objet. Nous illustrons ces affirmations sur les objets usuels à la section 3.5.1. Enfin les calculs coûteux de classification et de segmentation pour chaque niveau de résolution sont ici évités, puisqu'une seule approximation devra être classifiée.

La première règle d'agrégation concentre les valeurs liées à l'ensemble des coefficients sur chaque sommet du niveau de décomposition le plus fin. Nous avons formalisé le calcul de la moyenne pour chaque sommet de n'importe quel élément de la hiérarchie, qui est complété par des illustrations adéquates, pour une meilleure compréhension. Pour cette première règle, deux cas différents peuvent être rencontrés, en fonction du niveau de résolution du sommet considéré. Le niveau de résolution d'un sommet est directement lié à la construction du maillage semi-régulier à partir du complexe de



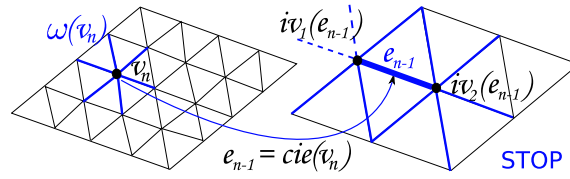


FIG. 3.22 – Calcul de la moyenne pour le sommet  $v_n$  (ajouté au niveau de décomposition  $n$ ), en considérant l'ensemble des mesures liées aux arêtes du niveau  $n$  et des niveaux inférieurs (arêtes correspondantes représentées en bleu).

base. Comme nous l'avons vu auparavant, une stratégie par quadrisection canonique est utilisée pour ajouter les nouveaux sommets à chaque résolution. N'importe quel sommet de la hiérarchie est ainsi ajouté à un niveau de résolution donné, que nous appelons "son niveau de résolution". Avant de définir formellement notre mesure moyenne, nous indiquons quelques notations de base, illustrées sur les figures 3.22 et 3.23 pour les deux cas différents.

De façon plus détaillée, si un sommet  $v_n$  a été ajouté au niveau  $n$  considéré pour l'agrégation, il n'aura aucun équivalent dans les niveaux plus grossiers. C'est pourquoi la moyenne n'est calculée que jusqu'au niveau  $n - 1$  (moyenne sur les deux sommets incidents à l'arête associée à  $v_n$  au niveau  $n - 1$ , représentés sur la figure 3.22). Les niveaux inférieurs ne sont pas considérés, puisque cela nécessiterait de prendre en compte un trop large voisinage, et la mesure ne serait plus localisée. Pour les autres types de sommets, on utilise la même règle lorsqu'on arrive sur le niveau de résolution correspondant au niveau du sommet étudié, comme sur la figure 3.23.

Etant donné un sommet  $v_n \in \mathcal{V}_n$  (ici  $\mathcal{V}_n$  est l'ensemble des sommets de la  $n^{\text{ième}}$  décomposition sur laquelle la moyenne des mesures sera agrégée), on note respectivement son niveau de résolution associé ainsi que l'ensemble de ses arêtes incidentes par  $\lambda$  et  $\omega(v_n)$ . Le nombre d'arêtes constituant  $\omega(v_n)$  définit la valence de  $v_n$ . Pour la mesure étudiée (amplitude ou angle polaire des coefficients), nous appelons  $\delta(e_n)$  la valeur correspondante associée à l'arête  $e_n$  à laquelle le coefficient est rattaché. La notation  $iv_1(e_n)$  et  $iv_2(e_n)$  décrit les deux sommets directement incidents à l'arête  $e_n$ . De la même façon,  $civ(v_n)$  et  $cie(v_n)$  correspondent respectivement au sommet et à l'arête plus grossiers incidents à  $v_n$  (figure 3.23). Enfin, le terme  $fiv(v_n)$ , représenté sur la figure 3.24, référence le sommet incident à  $v_n$ , dans le niveau directement plus fin.

La valeur moyenne  $\Delta_\mu^c(v_n)$  calculée sur plusieurs niveaux (sans aller plus loin que le niveau de décomposition le plus grossier  $\lambda_c$ ) et associée à  $v_n$  est exprimée à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta_\mu^c(v_n) = \delta_\mu(v_n) + \sum_{n-1 \leq l \leq \lambda} \delta_\mu(v_l) + \delta_\mu(iv_1(e_{\lambda-1})) + \delta_\mu(iv_2(e_{\lambda-1}))$$

où les deux derniers termes ne sont considérés que si  $\lambda > \lambda_c$  et pour un sommet  $v_n$  et un entier  $i > 0$ ,

$$v_{n-i} = civ(v_{n-i+1}), \quad e_{n-i} = cie(v_{n-i+1}) \quad \text{et} \quad \delta_\mu(v_n) = \sum_{e_n \in \omega(v_n)} \delta(e_n).$$

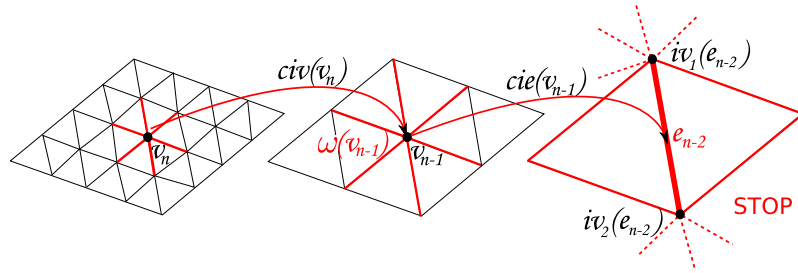


FIG. 3.23 – Calcul de la moyenne pour le sommet  $v_n$  (ajouté à un niveau de décomposition inférieur à  $n$ ), en considérant l'ensemble des mesures liées aux arêtes du niveau  $n$  et des niveaux inférieurs (arêtes correspondantes représentées en rouge).

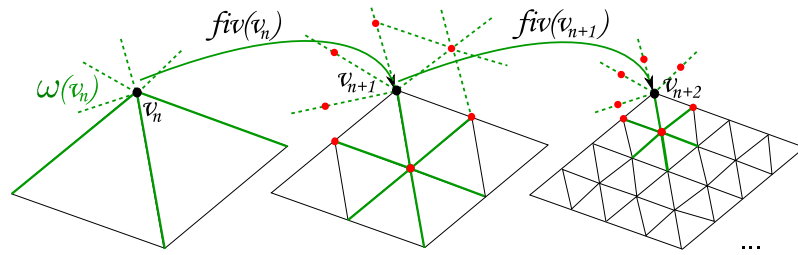


FIG. 3.24 – Calcul de la moyenne pour le sommet  $v_n$ , en considérant l'ensemble des mesures liées aux arêtes du niveau  $n$  et des niveaux supérieurs (arêtes correspondantes représentées en vert). Les voisins incidents dans les niveaux plus fins (représentés en rouge) sont impliqués dans le calcul de la moyenne.

Si la classification et la segmentation sont basées sur cette première règle d'agrégation, un raffinement de la segmentation (réalisée sur le premier niveau de décomposition) est nécessaire pour la projeter sur le maillage semi-régulier d'origine. Dans ce cas, le seul moyen d'appliquer une analyse multirésolution indépendante sans ajouter un nombre important d'information complémentaires, serait de passer par un remaillage de chaque partition. Pour ne pas compliquer les traitements et conserver le remaillage d'origine, nous avons plutôt considéré des "projections grossières" dans les niveaux inférieurs. Ce procédé, expliqué au chapitre suivant, construit alors une approximation de la segmentation initiale, sans trop la dégrader pour produire des résultats acceptables.

Nous avons souhaité comparer cette dernière approche avec une deuxième règle de calcul de moyenne (illustrée sur la figure 3.24), utilisant une stratégie similaire mais dans la direction "opposée", puisque l'agrégation sera faite sur la résolution la plus grossière. Ainsi les moyennes des valeurs liées aux coefficients de la hiérarchie sont calculées à partir du niveau le plus grossier, jusqu'à l'approximation la plus fine.

Dans ce cas, pour un sommet  $v_n \in \mathcal{V}_n$  (où  $n$  représente le niveau de l'approximation sur laquelle la moyenne des mesures sera agrégée), la moyenne correspondante est définie jusqu'au niveau de décomposition le plus fin ( $\lambda_f$ ) et exprimée de la façon suivante :

$$\Delta_\mu^f(v_n) = \sum_{n \leq l \leq \lambda_f} \delta_\mu(v_l)$$

où les notations précédemment exposées sont considérées. De plus, pour un entier

$i > 0$ ,  $v_{n+i} = fiv(v_{n+i-1})$  représente le sommet incident directement plus fin que  $v_{n+i-1}$ . De la même façon que pour la règle d'agrégation précédente, le 1-voisinage est considéré lors du calcul de la moyenne sur le niveau  $n$ . Concernant le niveau de résolution immédiatement supérieur ( $n + 1$ ), on s'intéresse cette fois-ci au 2-voisinage, vu que la taille des triangles est alors deux fois plus faible. Pour les approximations plus fines suivantes, nous nous sommes limités à un calcul de moyenne sur le 2-voisinage, de façon à restreindre leur influence dans le calcul de la moyenne globale sur l'ensemble de la hiérarchie.

Etant donné ces distributions "agrégées" sur un maillage particulier, il est alors possible de classifier et de segmenter ce maillage en considérant une ou plusieurs des mesures étudiées. Avant d'expliquer nos algorithmes de classification et de segmentation, nous présentons et comparons dans la section suivante, les résultats des différentes considérations exposées précédemment.

## 3.5 Comparaisons expérimentales

### 3.5.1 Comparaison de la répartition des coefficients

Nous illustrons sur les figures 3.25 à 3.28 les distributions citées précédemment pour les objets "Venus", "Horse" et "Feline" remaillés par les deux algorithmes *MAPS* et *NM*. Une normalisation Gaussienne a généralement été utilisée (surtout pour l'amplitude des coefficients), afin d'obtenir des résultats plus significatifs pour la classification. L'échelle de couleurs utilisée pour ces distributions est la même que celle présenté à la figure 3.25. Sur ces modèles globalement lisses, la distribution de l'amplitude des coefficients permet d'identifier les fortes courbures caractérisant les yeux, le nez, la bouche ou les oreilles et aussi les extrémités des modèles (cou ou pieds). La répartition de cette mesure isole également les parties texturées, comme les cheveux du modèle "Venus" ou les ailes et pieds du modèle Feline. Pour ces endroits spécifiques, un autre schéma de prédiction, ainsi qu'une décomposition et une quantification différentes pourraient fournir de meilleurs résultats en terme de compression.

Les modèles semi-réguliers étudiés ont été remaillés par les algorithmes *NM* [44] ou *MAPS* [67]. Mais n'importe quel autre remaillage pourrait être considéré pour caractériser la distribution des ondelettes sous-jacentes, sachant que le principe de notre méthode de segmentation est de trouver, sur n'importe quel objet semi-régulier à disposition, les régions pour lesquelles les ondelettes pourraient être réduites.

Si nous comparons les distributions obtenues avec les deux remaillages considérés sur l'objet "Venus" (figures 3.25 et 3.27), on peut voir que le remailleur normal permet de mieux repérer les caractéristiques de l'objet, puisque les ondelettes sont concentrées le long de la normale à la surface. Les modèles ( $j$ ) à ( $l$ ) de la figure 3.25 confirment cette dernière affirmation par l'étude de la distribution de l'angle polaire. Les mêmes types de résultats ont été obtenus pour d'autres modèles usuels, ce qui confirme bien qu'il n'est pas nécessaire de considérer cette dernière distribution pour ce type de remaillage.

Sur les cinq premiers niveaux de décomposition de "Venus" (images ( $b$ ) à ( $f$ ) de la figure 3.25), les mêmes caractéristiques principales sont mises en valeur de façon plus ou moins grossière suivant le niveau considéré, mais certains détails apparaissent seule-

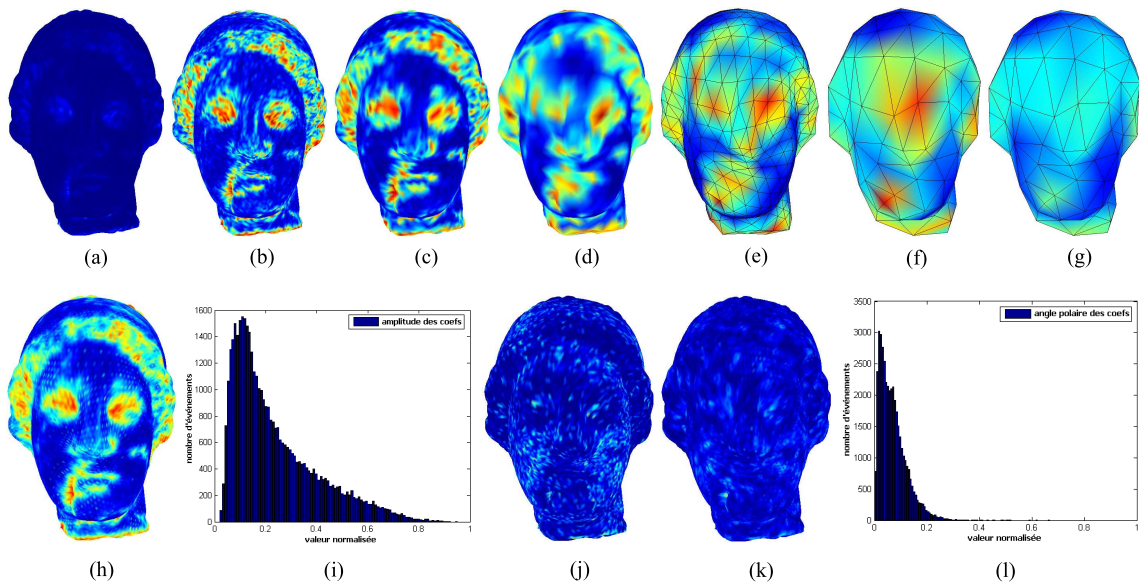


FIG. 3.25 – Distribution de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes à différents niveaux de résolution sur le modèle "Venus" remaillé par *NM*. (a) Amplitude normalisée sur le 1<sup>er</sup> niveau et (b-f) en utilisant une normalisation Gaussienne sur les cinq premières approximations. (g) Distribution considérant la seconde règle de calcul des moyennes agrégées sur le niveau le plus grossier. (j) Normalisation de l'angle polaire sur le 1<sup>er</sup> niveau. Première règle de calcul des moyennes agrégées sur le 1<sup>er</sup> niveau de décomposition pour l'amplitude (h, i) et l'angle polaire (k, l).

ment à certaines résolutions, comme par exemple en dessous de l'oeil droit sur l'image (b). Le même genre de résultats peuvent être observés sur le modèle Horse (figure 3.26), en considérant les petits détails sur les pattes, visibles seulement sur l'image (b).

Comme nous avons pour objectif de produire une segmentation qui identifie les hautes fréquences perdues durant le processus d'approximation, une considération globale de l'ensemble des coefficients dans la hiérarchie complète est nécessaire. Les règles d'agrégation développées dans ce but, permettent de retenir les caractéristiques principales sur l'ensemble de la hiérarchie. Ceci est particulièrement visible lorsqu'on utilise la première des deux règles (images (h) et (f) des deux figures précédentes), mais nous reviendrons au chapitre suivant sur l'intérêt de la seconde règle. En effet, la première permet d'estomper les détails isolés et d'accentuer ceux qui sont plus importants.

Au contraire, *MAPS* répartit les informations sur les composantes tangentielles et normales, comme nous pouvons le voir en regardant les distributions de la figure 3.27. Dans ce cas, il est utile de considérer une autre mesure que la simple amplitude des coefficients, pour pouvoir se comparer aux résultats produits par l'algorithme précédent. Nous détaillons au chapitre suivant les différentes associations nécessaires à une bonne classification dans ce cas précis.

Le même style d'agrégation sur le premier des cinq niveaux de résolution de "Feline", présenté sur l'image (e) de la figure 3.28, ne met pas en valeur les caractéristiques les plus importantes de la surface. Cette observation vient de la distribution non habituelle de l'angle polaire à ce niveau (images (f) et (g)). Vu que cela n'apparaît qu'à ce niveau de résolution, nous décalons le traitement au second niveau, pour lequel les dis-

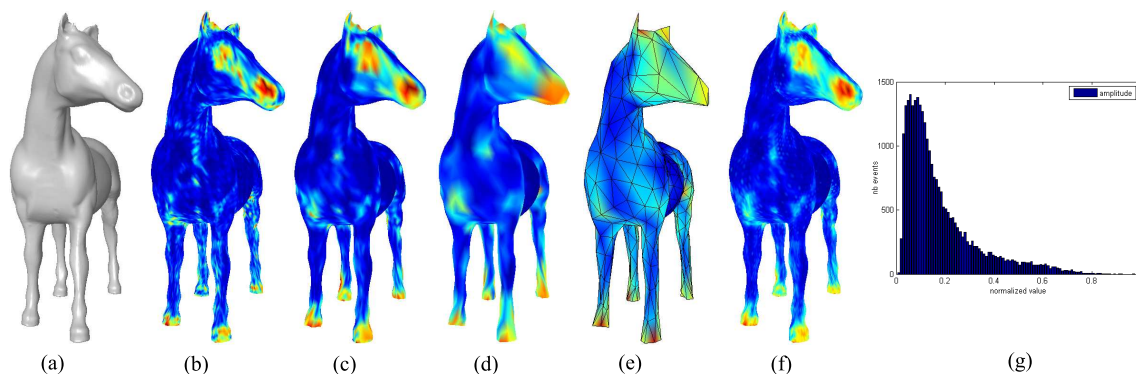


FIG. 3.26 – Distribution de l'amplitude des coefficients d'ondelettes sur le modèle "Horse" remaillé par NM. (a) Modèle original ; (b, e) Normalisation Gaussienne de l'amplitude sur les quatre premiers niveaux ; (f, g) Moyenne des amplitudes agrégée sur le 1<sup>er</sup> niveau de décomposition (première règle considérée).

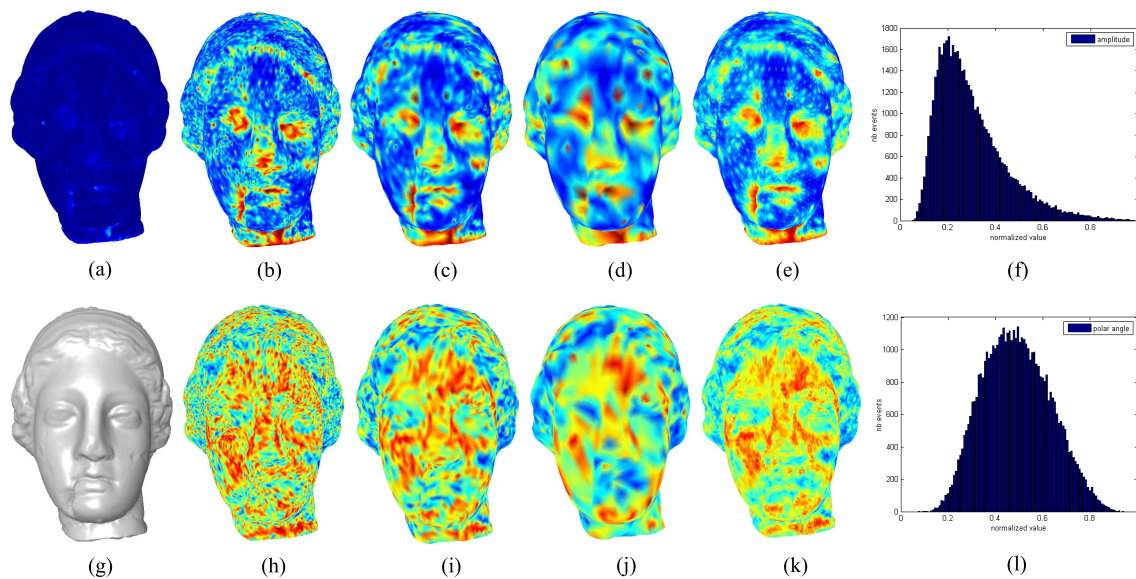


FIG. 3.27 – Distribution de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes à différents niveaux de résolution sur le modèle "Venus" remaillé par MAPS. (a) Amplitude normalisée sur le 1<sup>er</sup> niveau et (b-d) en utilisant une normalisation Gaussienne sur les trois premières approximations. (g) Modèle original. (h-j) Normalisation de l'angle polaire sur les trois premiers niveaux. Première règle de calcul des moyennes agrégées sur le 1<sup>er</sup> niveau de décomposition pour l'amplitude (e, f) et l'angle polaire (k, l).



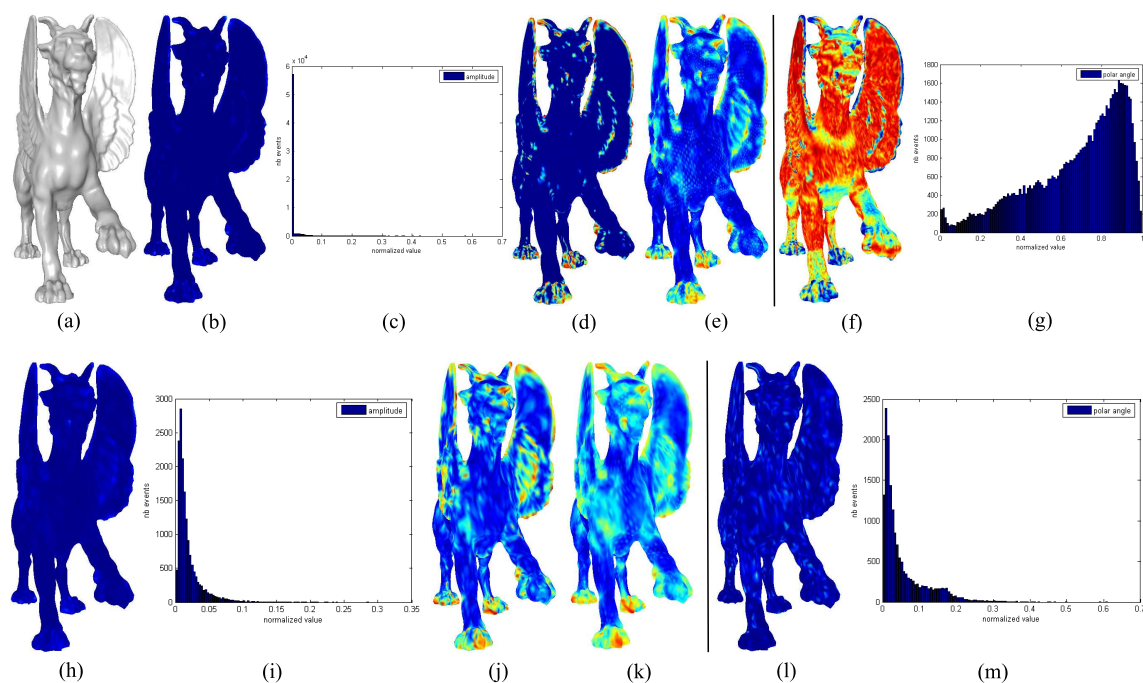


FIG. 3.28 – Distribution de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes à différents niveaux de résolution sur le modèle "Feline" remaillé par NM. 1<sup>ère</sup> ligne : (a) Modèle original; (b, c) Amplitude et (f, g) angle polaire normalisés sur le 1<sup>er</sup> niveau et son histogramme associé; (d) Même distribution en utilisant une normalisation Gaussienne et (e) la 1<sup>ère</sup> règle de calcul des moyennes agrégées. 2<sup>nd</sup>e ligne : Mêmes distributions sur la 2<sup>nd</sup>e décomposition.

tributions sont présentées sur la deuxième ligne et sont bien en accord avec les résultats observés sur les modèles précédents.

### 3.5.2 Comparaisons des résultats avec d'autres mesures de rugosité

Pour montrer que la distribution de l'amplitude des coefficients d'ondelettes a tendance à séparer les parties lisses des parties rugueuses de la surface des objets, nous avons comparé nos résultats avec la mesure de rugosité développée par Lavoué *et al.* [64], basée sur l'estimation de la courbure discrète dans un voisinage local. Nous avons enfin considéré une autre mesure de rugosité plus triviale, détaillée par la suite.

#### 3.5.2.1 Calcul de rugosité basé sur l'estimation de la courbure discrète

Pour comprendre comment est calculée la première mesure de rugosité considérée (basée sur la courbure discrète), revenons d'abord sur la méthode d'estimation de cette courbure. Pour chaque sommet, les courbures principales ( $k_{min}$  et  $k_{max}$ ) et directions principales ( $d_{min}$  et  $d_{max}$ ) sont obtenues à partir du tenseur de courbure, calculé en chaque sommet et basé sur les estimateurs de Cohen-Steiner et Morvan [19]. Les courbures et directions principales correspondent respectivement aux valeurs propres et aux vecteurs propres du tenseur de courbure, avec un ordre commuté (le vecteur propre lié à  $k_{min}$  est  $d_{max}$  et vice versa). Les lecteurs intéressés par les méthodes utilisées pour le calcul de ces tenseurs de courbures, peuvent se référer à la thèse de Lavoué [62]. Nous

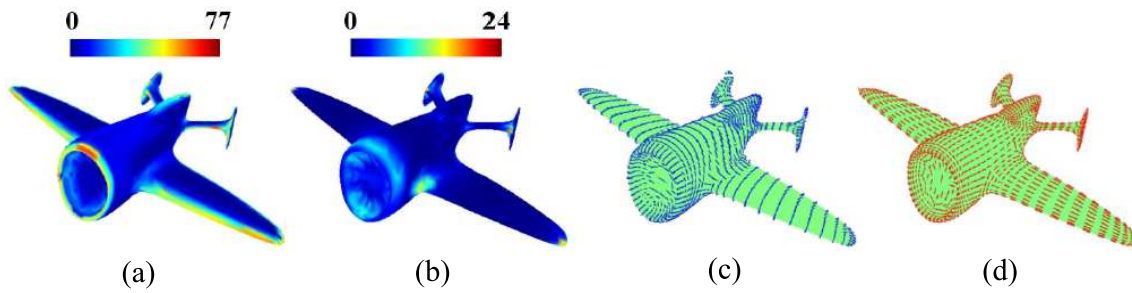


FIG. 3.29 – Champs de courbure pour l'objet Avion. (a)  $k_{max}$ , (b)  $k_{min}$  (valeur absolue), (c)  $d_{max}$ , (d)  $d_{min}$ . Image tirée de [62].

nous intéressons ici seulement à la comparaison de la rugosité sous-jacente avec les distributions de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes.

La figure 3.29 présente un exemple des champs de courbure décrits précédemment, sur l'objet "Avion". Sur le bord des ailes,  $k_{max}$  est élevé, tandis que  $k_{min}$  est nul, car c'est une région parabolique. Sur les régions elliptiques,  $k_{min}$  est positif comme à l'extrémité des ailes, et négatif dans les régions hyperboliques comme aux jointures entre les ailes et le corps de l'avion. L'estimation de la courbure est définie mathématiquement pour une surface lisse, tandis que les directions principales de courbure possèdent une signification uniquement dans les régions anisotropes (elliptique, parabolique ou hyperbolique), où elles représentent les lignes de courbure de l'objet. Sur les régions isotropes (sphérique, planaire), elles ne portent aucune information.

A partir des courbures principales ( $k_{min}$  et  $k_{max}$ ), la courbure moyenne se calcule de la façon suivante :  $k_{mean} = (k_{max} + k_{min})/2$ . Nous l'avons représentée sur l'image (a) de la figure 3.30, illustrant le premier niveau de décomposition de l'objet "Venus", remaillé par NM, pour une comparaison avec nos résultats, calculés à partir des coefficients d'ondelettes. On définit également la courbure Gaussienne  $kg$  comme le produit des deux courbures principales ( $kg = k_{max}.k_{min}$ ). Cette information permet de décrire facilement le comportement géométrique d'une surface. En effet, un point  $p$  de cette surface est alors reconnu comme elliptique si  $kg > 0$ , hyperbolique si  $kg < 0$  ou parabolique si  $kg = 0$ .

La mesure de rugosité introduite par Lavoué *et al.* [64] est basée sur les différences de courbures, dans une fenêtre locale (sphère  $x$  de rayon paramétrable) centrée en chaque sommet du maillage et indépendante de la connectivité. La rugosité en chaque sommet (illustrée sur l'image (c)) est alors caractérisée par la variance de la courbure discrète, dans cette même fenêtre.

### 3.5.2.2 Calcul de lissage par le Laplacien discret

Le deuxième algorithme utilisé pour refléter la rugosité calcule la différence des normales entre le modèle considéré et une version lissée obtenue grâce à un lissage Laplacien. Le filtre utilisé (introduit par Taubin [117]), remplace un sommet par la moyenne calculée sur son 1-voisinage. Ce filtre a été itéré cinq fois pour obtenir le polyèdre lissé dont on compare les normales avec le modèle original. Le score de rugosité associé à



chaque sommet (illustré sur la dernière image de la figure 3.30), représente l'angle en degré entre ces normales.

### 3.5.2.3 Comparaison avec notre mesure basée sur les ondelettes

Nous présentons pour finir, plusieurs distributions de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes, sur la première approximation de l'objet "Venus" remaillé par les algorithmes *NM* (première ligne) et *MAPS* (seconde). La partie gauche présente les distributions pour une analyse par prédiction Butterfly non liftée, tandis que celle de droite concerne la subdivision linéaire. Cette partie gauche ne considère pas la distribution de l'angle polaire, étant donné que la majorité des coefficients d'ondelettes obtenus par prédiction Butterfly non liftée sur des objets remaillés par *NM*, ne possède qu'une composante normale.

On remarque premièrement que l'application de la normalisation Gaussienne sur les mesures d'amplitude des coefficients, permet d'amplifier de façon significative les contrastes, de manière à envisager une segmentation basée sur ces mesures. De plus, la considération de la moyenne des coefficients sur l'ensemble de la hiérarchie (grâce à notre première règle d'agrégation), produit d'une part une plus grande uniformisation de la distribution et d'autre part une élimination des détails intrinsèques au premier niveau de résolution, non représentatifs de la rugosité surfacique de l'objet. Si l'on compare cette fois-ci avec le même type de distribution, obtenue cette fois-ci par subdivision linéaire, on s'aperçoit pour les deux remaillages que les fortes valeurs ont tendance à s'étaler d'avantage sur la surface. Ceci est dû au fait que ce schéma réalise une moins bonne prédiction dans les zones lisses. L'analyse de la distribution des angles polaires dans l'intervalle  $[0, \pi/2]$  montre bien un "découpage" des mêmes régions, mais pour des valeurs inversées (les angles polaire élevés se situent au niveau des zones lisses).

Pour finir, alors que l'on notait une variation importante des distributions précédentes entre les deux remaillages, les deux figures de la dernière colonne (représentant la distribution de l'angle polaire défini dans l'intervalle  $[0, \pi]$ ) sont cette fois-ci très proches. Elles font bien ressortir les zones à fortes courbures qui séparent deux régions lisses. Cette dernière mesure étant toutefois plus difficile à exploiter que les deux autres par notre algorithme de partitionnement en régions connexes, nous la gardons pour de futurs travaux de recherche. Le même type d'analyse a été constaté sur les autres objets à disposition remaillés par *NM* et *MAPS*. Il serait tout de même intéressant d'analyser cette dernière distribution sur les objets produits par d'autres remaillages, afin de vérifier si les mêmes constatations se dégagent. Ceci permettrait un traitement uniformisé pour différents types de remaillages considérés.

Si l'on compare maintenant les figures 3.31 et 3.30, on note que la distribution de l'amplitude des coefficients sur l'objet remaillé par *NM* (par l'un ou l'autre des deux schémas) se rapproche plus des mesures de rugosités considérées par Lavoué *et al.* [64]. C'est la raison pour laquelle nous avons principalement basé notre méthode de segmentation sur cette mesure, pour obtenir des régions uniformes en terme de rugosité, délimitant généralement des parties caractéristiques de l'objet.

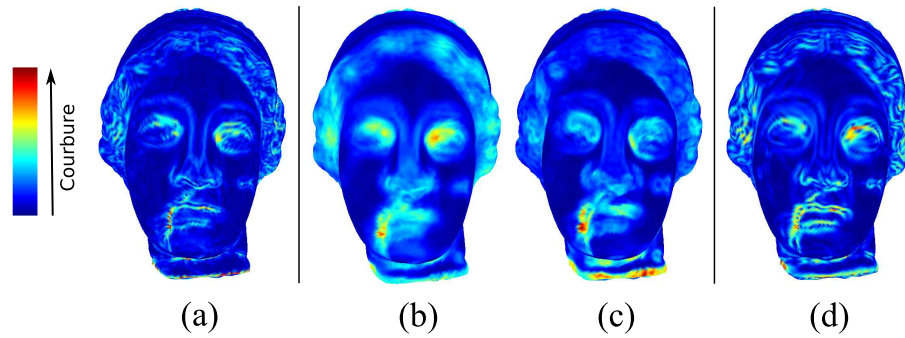


FIG. 3.30 – Différentes mesures obtenues à partir du tenseur de courbure basé sur les estimateurs de Cohen-Steiner *et al.* [19], sur le premier niveau de décomposition de l'objet "Venus" remaillé par NM. (a) Courbure moyenne : kmean. (b, c) Moyenne et variance de la courbure discrète, définies en chaque sommet dans une fenêtre locale. La variance correspond à la première mesure de rugosité considérée pour nos comparaisons. (d) Deuxième mesure de rugosité considérée, correspondant à la différence des normales entre le modèle considéré et une version obtenue par un lissage Laplacien [117].

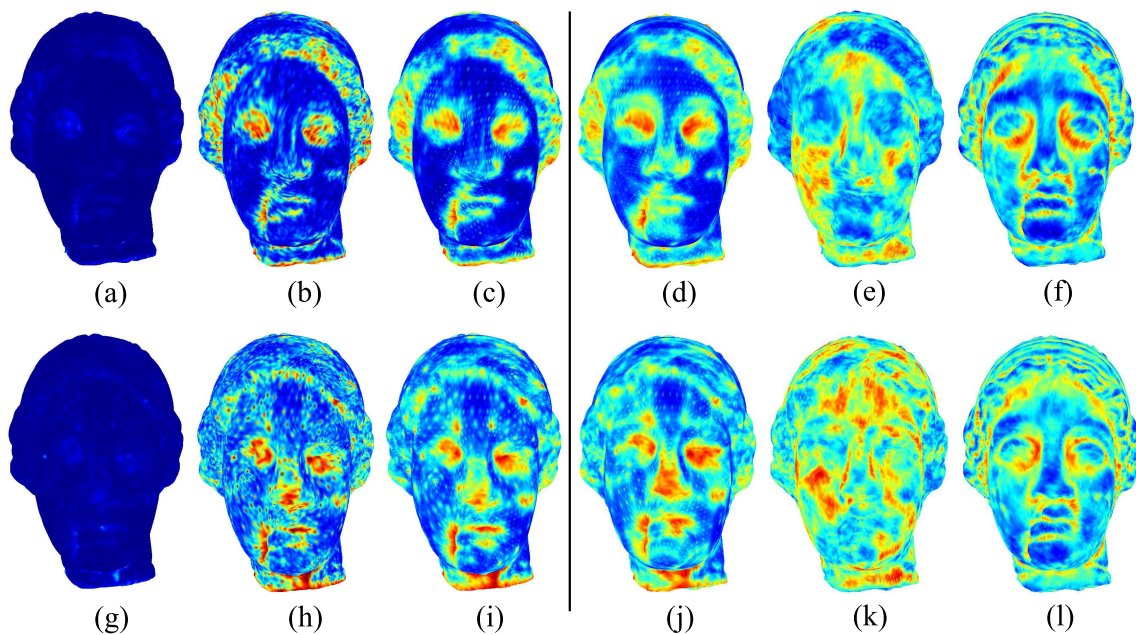


FIG. 3.31 – Comparaison de la distribution de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes sur la première approximation de l'objet "Venus" remaillé par les algorithmes MAPS et NM et analysé par subdivision Butterfly et midpoint. 1<sup>ère</sup> ligne : remaillage "normal". (a, b) Normalisation simple et Gaussienne de l'amplitude des coefficients associés au 1<sup>er</sup> niveau de décomposition et obtenus par subdivision Butterfly. (c) Distribution moyenne sur l'ensemble de la hiérarchie avec le même schéma de subdivision. (d-f) Distributions normalisées obtenus par subdivision linéaire et représentant respectivement l'amplitude et l'angle polaire défini dans les intervalles  $[0, \pi/2]$  et  $[0, \pi]$ . 2<sup>ème</sup> ligne : mêmes considérations sur l'objet remaillé par MAPS. On remarque que les deux distributions de la dernière colonne sont très proches. Elles permettent d'identifier les coefficients pour lesquels l'information paramétrique n'est pas implicite.

## 3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'étude et la comparaison de plusieurs schémas d'analyse multirésolution, basés sur les ondelettes de subdivision. Nous avons plus précisément étudié les distributions de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients, produits par plusieurs fonctions d'échelles et d'ondelettes, sur des objets semi-réguliers plus ou moins lisses. Ces mesures sur les coefficients sont celles que tout algorithme de compression tente de réduire au maximum pour proposer des taux de compression compétitifs. Notre but principal est de proposer une segmentation basée sur ces mesures, de manière à traiter localement durant tout le processus de compression, les régions ainsi produites et fournir de meilleurs taux de compression ainsi que d'envisager de nouvelles applications.

Notre application logicielle nous a alors permis de visualiser les distributions spatiales et la répartition des coordonnées de ces coefficients dans chaque niveau de résolution, dans un repère global ou local. Ces études nous ont servi à caractériser les différences de comportements sur les structures issues des algorithmes de remaillage considérés. A savoir que notre objectif est d'analyser la répartition surfacique des mesures étudiées, sur n'importe quel type de maillage semi-régulier.

Les études menées sur les différentes distributions de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients, produits par plusieurs fonctions d'échelles et d'ondelettes, viennent conforter les résultats issus des travaux précédents. Ainsi, de façon générale, les ondelettes "lazy" donnent de moins bons résultats en termes d'erreur géométrique, sur les maillages remaillés par les deux algorithmes *NM* et *MAPS*. Comme les ondelettes à faible support ont tendance à être plus stables numériquement, nous n'avons pas considéré de supports plus larges pour nos études. Enfin, nous avons proposé un nouveau schéma de prédiction, légèrement différent du schéma Butterfly, dans le but de simplifier la prise en compte des sommets irréguliers (peu présents dans les structures semi-régulières). La simplicité de ce schéma est intéressante, mais il n'est pas assez différent pour proposer de réels changements. De nouvelles investigations en ce sens sont détaillée au dernier chapitre.

Nous avons, dans un second temps, cherché à agréger les coefficients de tous les niveaux de résolution, de façon à représenter l'ensemble des hautes fréquences du modèle sur un unique maillage d'approximation. Il est alors plus facile et rapide de procéder à la segmentation de cette structure que de l'ensemble des approximations. Les résultats produits par ces agrégations en terme d'amplitude et d'angle polaire ont toujours tendance à séparer les zones à forte courbure ou texturée des parties lisses. En effet, nous nous sommes aperçus de façon générale que les mesures considérées avaient tendance à séparer les régions surfaciques lisses de celles présentant un aspect plus rugueux ou texturé. Pour nous en rendre mieux compte, nous avons comparé nos résultats avec plusieurs mesures de rugosité introduites par Lavoué *et al.* [64]. Pour revenir à l'agrégation, cette approche permet de retirer certains détails n'apparaissant qu'à un niveau donné et peu caractéristiques de l'ensemble des hautes fréquences du modèle.

Cette caractérisation de la rugosité de la surfaces par les coefficients d'ondelettes a ouvert la voie à une méthode de segmentation de surfaces un peu différentes des approches considérées jusqu'à présent et présentée au chapitre suivant.



# Segmentation de maillages basée ondelettes

## 4.1 Introduction

Les schémas d'analyse étudiés précédemment ainsi que les distributions associées des coefficients d'ondelettes nous ont servi à l'élaboration d'une nouvelle méthode de segmentation de maillages 3D. Celle-ci a pour but de séparer les régions surfaciques lisses de celles présentant un aspect rugueux. Cette différenciation fréquentielle permet ainsi un repérage des parties caractéristiques de l'objet dans un but d'indexation, de visualisation ou de compression adaptative. Ces travaux ont été présentés lors de la conférence internationale SPIE Visual Communications and Image Processing [100].

Notre objectif est de produire un partitionnement surfacique des maillages à partir des ondelettes, dans le but d'adapter localement la compression aux régions produites. Ce partitionnement en régions d'amplitudes fréquentielles variables est produit grâce à une première phase de classification basée sur les mesures et les calculs de moyenne présentés au chapitre précédent. Nous avons pour cela adapté les algorithmes de classification et de segmentation basés sur la courbure discrète et implémentés par Lavoué *et al.* [63]. Avant de détailler leur technique puis exposer nos adaptations, nous proposons un rapide survol des méthodes de segmentation de maillages.

Notre adaptation a consisté à remplacer l'information de courbure calculée en chaque sommet, par l'amplitude et l'angle polaire des coefficients d'ondelettes rattachés aux arêtes de l'ensemble des décompositions multirésolution d'un maillage cible. Les résultats de segmentation sont présentés sur plusieurs objets semi-réguliers obtenus par les deux algorithmes de remaillage considérés jusqu'à présent (MAPS [67] et NM [44]).

## 4.2 Etat de l'art en partitionnement de maillages

Depuis ces deux dernières décennies, un nombre important de travaux ont été développés en segmentation de formes, à cause de son utilité pour un grand nombre d'applications en informatique graphique. Ces méthodes sont habituellement conçues pour résoudre un problème spécifique avec des approches et des critères de segmentation différents, qu'il est souvent difficile de comparer. Le partitionnement de maillages est utilisé notamment pour des applications comme la détection de collision, l'extraction de squelettes, la métamorphose, l'animation ou la modélisation par parties. Dans ces cas précis, l'objet est décomposé en régions correspondant à des parties caractéristiques du modèle (sous-maillages), ce qui se révèle assez éloigné de nos attentes. Pour les auteurs intéressés, les techniques sous-jacentes de ces méthodes dites de segmentation en parties

significatives sont décrites dans l'étude de Attene *et al.* [4].

D'autres types d'applications utilisent la segmentation pour simplifier les traitements comme le placage de textures, la paramétrisation, l'édition de maillages, la modélisation, la déformation, la simplification ou la compression de maillages complexes ayant un genre élevé par exemple. Ces traitements sont généralement plus rapide et moins complexes sur des patches surfaciques homéomorphes à un disque. Le partitionnement permet par exemple de réduire la taille de la matrice Laplacienne, dans le cas d'une analyse spectrale. Dans ce contexte, la plupart des algorithmes de segmentation existants sont basés sur l'information de courbure, de convexité ou de planarité calculées en chaque sommet de la surface. Les régions finales obtenues sont ainsi homogènes compte tenu des caractéristiques étudiées (courbure ou planarité).

Les premières méthodes de partitionnement des objets en patches surfaciques de caractéristiques communes tentent d'approximer l'objet par des faces planaires tout en minimisant l'erreur d'approximation entre cet ensemble d'éléments et la surface originale [32, 18]. Ces techniques d'approximation sont particulièrement utiles pour la simplification de maillages et le rendu. Dans ce dernier cas, le problème majeur est la gestion de la mémoire où un nombre trop important de polygones ralentit le rendu de la scène 3D. La simplification de maillage ou le partitionnement peut alors s'avérer très utile.

D'autres approches [82, 114] couplent le calcul de la courbure discrète en chaque sommet avec un algorithme de ligne de partage des eaux (LPE) adapté de ceux initialement prévus pour la segmentation d'image. Mangan *et al.* [82] ont ainsi généralisé la technique aux maillages, où la courbure Gaussienne (définie à la section 3.5.2.1 du chapitre précédent) est utilisée comme altitude (ou fonction de hauteur) pour chaque sommet. Par la suite, Pulla *et al.* [94] ont amélioré l'estimation de la courbure grâce au calcul de courbure absolue qui s'avère plus efficace pour la segmentation. Un autre type de mesure de courbure a été défini par Sun *et al.* [114], à partir d'une analyse en composantes principales (ACP) des vecteurs normaux à la surface, dans une fenêtre géométrique.

Le principe de LPE utilisé par toutes ces méthodes se base sur la simulation d'une immersion progressive (prenant sa source au niveau des minima de la fonction de hauteur) dans ce relief implicite. Ceci permet alors d'associer tous les points d'un même bassin comme faisant partie d'une même région. Les lignes de partage des eaux sont les lignes séparant deux bassins et définissant la frontière des régions. Ces lignes sont situées au niveau des zones à forte courbure correspondant généralement à des jonctions de parties.

Sachant que le nombre de régions obtenues est souvent trop important, un traitement supplémentaire est nécessaire pour supprimer la sur-segmentation générée par la LPE. Parmi les traitements possibles, Mangan *et al.* et Sun *et al.* ont utilisé une méthode de seuillage des régions, mais il est aussi possible de procéder à une segmentation hiérarchique (en faisant varier les dynamiques de contours) afin de disposer de plusieurs niveaux pour que l'utilisateur puisse en choisir un adapté à l'application visée. Enfin une variante, utilisée par Koschan [60] permet de considérer des marqueurs spécifiques comme source de l'inondation, afin de réduire le nombre de bassins initiaux.



Enfin, Razdan *et al.* [96] ont proposé une approche hybride qui combine un algorithme de ligne de partage des eaux avec une extraction des arêtes vives du maillage. Mais même si cette dernière améliore les frontières des régions par rapport à la méthode pionnière, les approches non hiérarchiques n'extraient généralement que les régions entourées de fortes courbures où les frontières de patches sont souvent floues ou dentelées. C'est pourquoi les travaux récents de Delest *et al.* [21] tentent de proposer une hiérarchie de segmentations, grâce à une LPE calculée sur le graphe dual du maillage qui a pour but de faciliter la recherche du meilleur niveau de segmentation.

La méthode développée par Lavoué *et al.* [63] résoud le problème de frontières grâce à un algorithme de classification par la méthode des K-Means [33] utilisée à la place de la technique de ligne de partage des eaux. Ainsi les transitions de courbure sont plus précisément détectées, en particulier sur les objets CAO lisses par morceaux, séparés par des arêtes vives. Pour ceux-ci, une approche de rectification de frontières, basée sur les directions principales de courbure permet de les rendre plus lisses et régulières. Les directions principales de courbure reflètent en effet le découpage naturel de l'objet. Elles ont d'ailleurs été utilisées par Ray *et al.* [95] pour le remaillage.

A la suite de la classification des courbures sous forme de clusters de sommets pouvant être dispersés sur la surface, une technique de croissance de régions permet d'aboutir à un ensemble de patches surfaciques connexes à partir de ces clusters. Les triangles germes sont les triangles ayant tous leurs sommets appartenant au même cluster. La classification préalable permet ainsi de ne pas sélectionner les germes au hasard, évitant un trop grand nombre d'itérations pour arriver à la solution finale. Nous proposons d'adapter cet algorithme pour le traitement d'objets plus denses et plus généraux (non nécessairement lisses par morceaux). Les objets étudiés sont tout de même des 2-variétés : nous ne considérons pas les soupes de triangles. La méthode de séparation de l'objets en zones homogènes de Lavoué *et al.* a ainsi été adaptée en vue d'une considération de l'homogénéisation d'un point de vue de la rugosité (intrinsèquement reflétée par l'amplitude ou l'angle polaire des coefficients d'ondelettes) et non de la courbure.

### 4.3 Algorithme général

Nous venons de voir que notre algorithme de segmentation est adapté de celui de Lavoué *et al.* [63], défini en détail sur le schéma de la figure 4.1. Seule la partie intitulée "segmentation en régions surfaciques" a été considérée, sans utiliser la première étape de détection des arêtes vives, puisque les coefficients d'ondelettes apportent déjà cette information et que les objets naturels étudiés en possèdent moins que ceux considérés par Lavoué *et al.*. En effet, les prédictions utilisées lors de la décomposition globale en ondelettes, basées sur les surfaces de subdivision, produisent des surfaces limites lisses. Ainsi les arêtes vives sont généralement associées à de forts coefficients d'ondelettes, surtout si les arêtes du maillage coïncident avec celles-ci.

Le schéma de la figure 4.2 résume l'ensemble des grandes opérations intervenant dans notre processus de partitionnement de l'objet semi-régulier d'entrée. Ce processus sert à détecter les parties homogènes de l'objet, relativement à l'amplitude et/ou l'angle polaire des coefficients d'ondelettes, que la majorité des algorithmes de compression cherchent à minimiser. Nous présentons dans les sections suivantes, toutes les adaptations mises en place sur les algorithmes originaux de Lavoué *et al.*, suite à



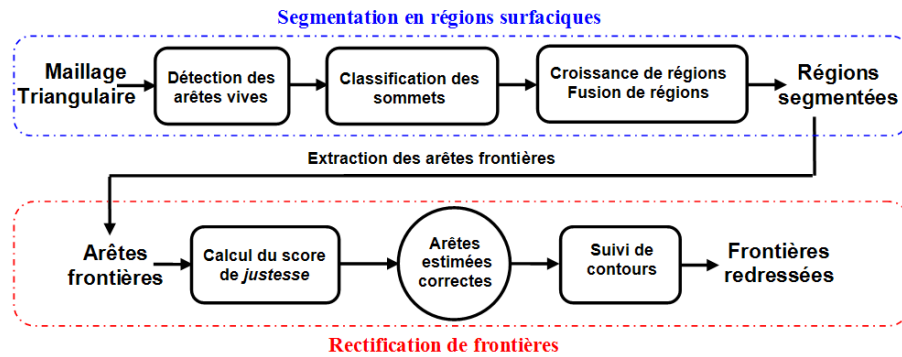


FIG. 4.1 – Schématisation des grandes étapes de l'algorithme de Lavoué *et al.* [63] pour la segmentation et la rectification de frontières. Image tirée de [62].

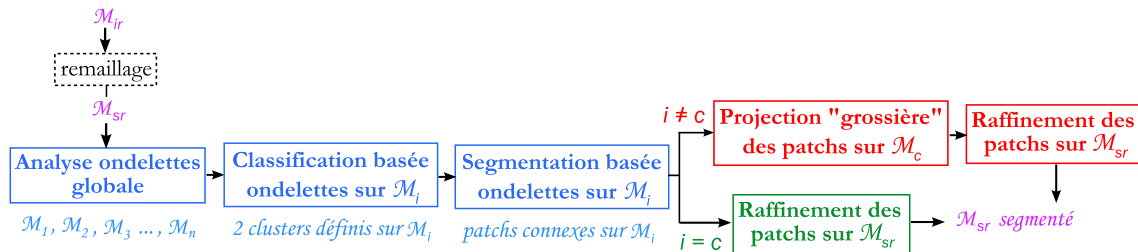


FIG. 4.2 – Grandes étapes de notre algorithme de segmentation d'un maillage semi-régulier  $M_{sr}$  (produit par remaillage de l'objet irrégulier d'origine  $M_{ir}$ ).  $M_i$  correspond à n'importe quelle approximation dans la hiérarchie multirésolution et  $M_c$  au maillage le plus grossier.

notre modification des critères de segmentation. La complexité de chaque grande étape est rappelée, ainsi qu'un ordre de grandeur du temps d'exécution (en fin de chapitre) sur plusieurs des objets usuels. De façon générale, sur l'ensemble de ces méthodes, la première adaptation a été de réécrire les algorithmes initiaux récursifs (adéquats pour le traitement de maillages relativement peu denses) en leurs équivalents itératifs. Ceci évite des problèmes de débordement de pile.

Les critères de segmentation considérés s'appuient sur les coefficients d'ondelettes, directement rattachés aux arêtes des approximations multirésolution. Les mesures d'amplitude et d'angle polaire normalisés (introduites au chapitre précédent) calculées à partir de chaque coefficient sont ainsi directement liées aux arêtes correspondantes. Pour associer ces mesures à chaque sommet ou facette, un calcul de moyenne est effectué où pour chaque sommet, on considère ses arêtes incidentes (dont le nombre est représentatif de la valence de celui-ci). La moyenne en chaque facette considère cette fois-ci les trois arêtes constitutives de la facette.

Nous comparons la classification et la segmentation pour ces trois cas, sur le premier niveau de décomposition des modèles "Venus" et "Horse" remaillés par NM (figures 4.3 et 4.4). Les couleurs utilisées pour les partitions ont été choisies aléatoirement. A savoir que les algorithmes utilisés ont été modifiés pour s'adapter à ces différentes associations. Les adaptations sont détaillées pour chaque traitement spécifique, dans la section suivante. On observe tout d'abord que les résultats de classification sont assez similaires,

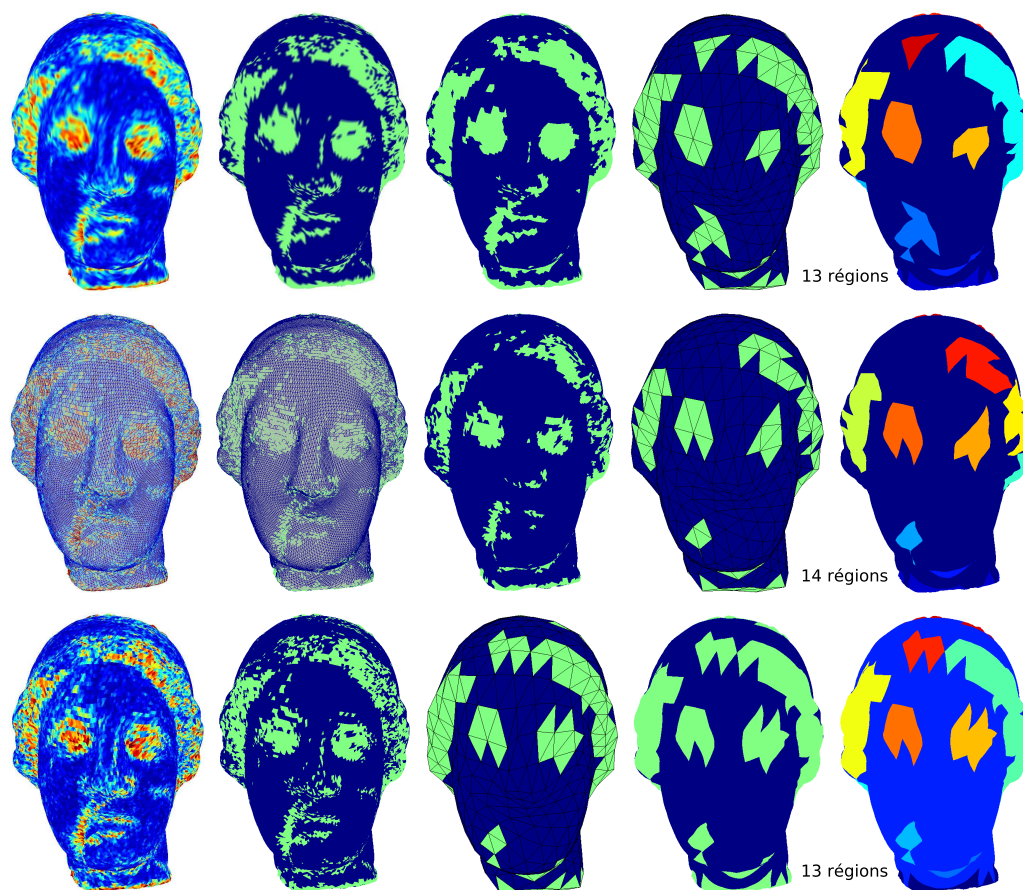


FIG. 4.3 – Distribution de l’amplitude normalisée des coefficients, associée aux sommets (ligne du haut), arêtes (milieu) ou facettes (ligne du bas) du premier niveau d’approximation de l’objet "Venus" remaillé par *NM*. Les grandes phases de notre algorithme (classification, croissance de régions, projection grossière et raffinement de la segmentation) sont ensuite illustrées pour ces trois considérations.

même si la classification des facettes a tendance à produire plus d’artéfacts, mais ceux-ci seront éliminés par notre étape de projection "grossière", détaillée par la suite. Ainsi les trois segmentations finales présentées, permettant une analyse multirésolution indépendante de chaque patch, se ressemblent beaucoup.

Nous avons ainsi considéré par la suite les moyennes en chaque sommet, afin de ne pas avoir à trop adapter le comportement des méthodes originales de classification et de segmentation basées sur les mesures de courbures discrètes associées aux sommets du maillage. Les distributions présentées sur les figures 4.3 et 4.4 ne prennent ni en compte les moyennes ni les règles d’agrégation énoncées au chapitre précédent, pour un aperçu simplifié. Mais dans la suite de ce document, ce sont ces règles qui sont considérées.

#### 4.4 Grandes étapes de notre algorithme de segmentation

Nous détaillons dans cette section les grandes étapes de notre algorithme, rappelées sur le schéma de la figure 4.2. Les coefficients d’ondelettes étudiés sont obtenus par analyse globale en ondelettes de l’objet, sous forme de schéma lifting, dont le principe pour les maillages surfaciques est schématisé sur la figure 3.8.

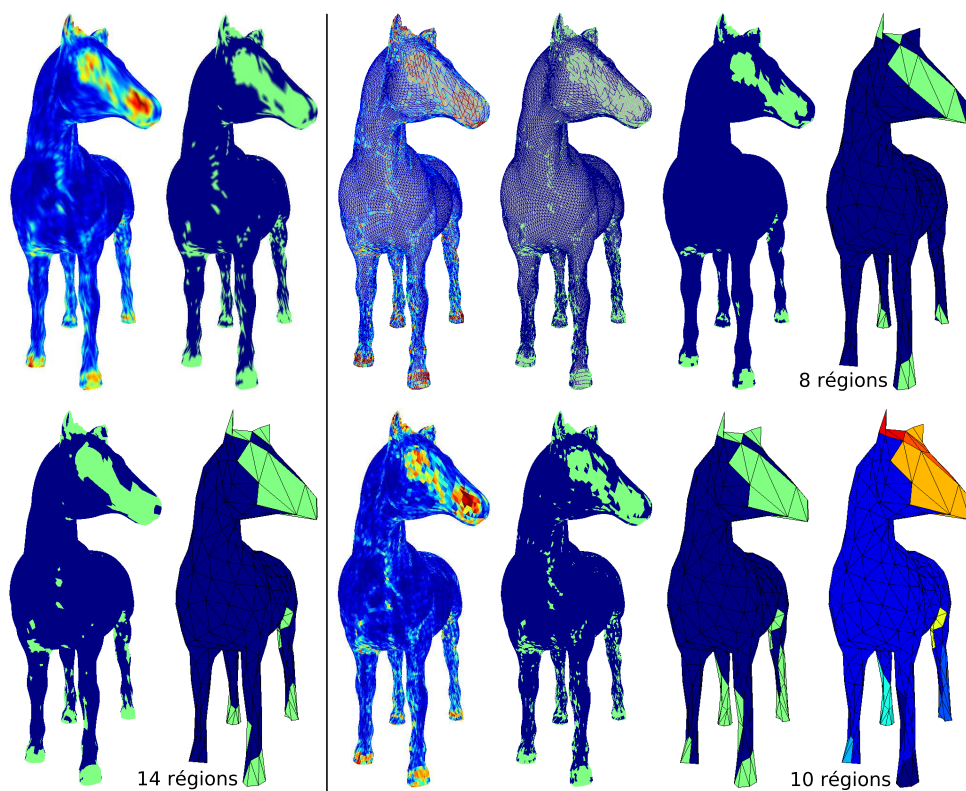


FIG. 4.4 – Distribution de l'amplitude normalisée des coefficients, associée aux sommets (à gauche), arêtes (en haut à droite) ou facettes (en bas à droite) du premier niveau d'approximation de l'objet "Horse" remaillé par *NM*. Les grandes phases de notre algorithme (classification, croissance de régions, projection grossière et raffinement de la segmentation) sont ensuite illustrées pour ces trois considérations.

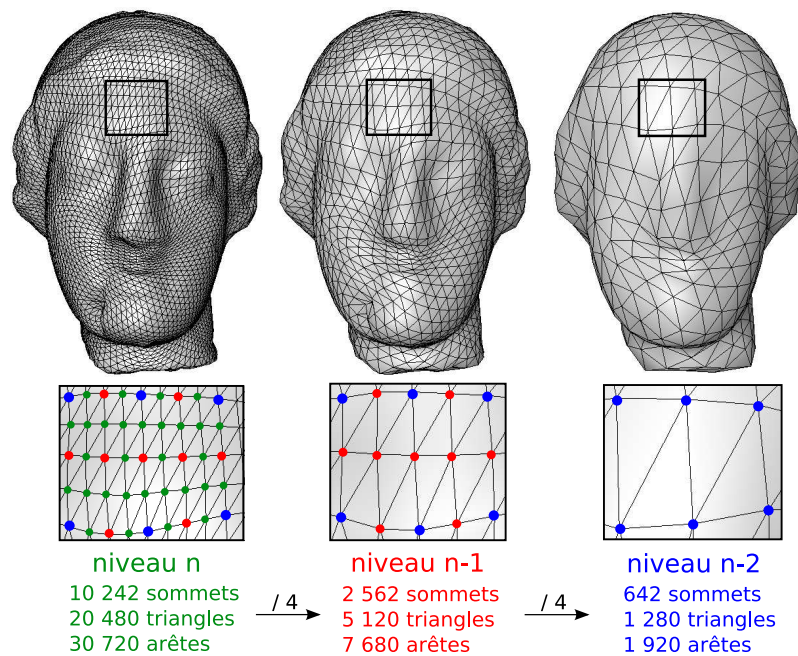


FIG. 4.5 – Illustration de la première étape d’analyse par schéma lifting, consistant à séparer les composantes paires et impaires, sur le modèle "Venus" remaillé par NM. On remarque qu’à chaque simplification, le nombre d’éléments constitutifs du maillage est divisé par quatre.

#### 4.4.1 Analyse multirésolution globale de l’objet semi-régulier

Dans la version que nous avons implémenté, nous conservons toutes les versions obtenues durant la décomposition, pour pouvoir visualiser les différents niveaux obtenus, appliquer plus facilement les moyennes utilisées par nos règles d’agrégation et obtenir des statistiques sur l’ensemble de la hiérarchie après n’importe quel traitement réalisé.

L’analyse globale est réalisée en partant du maillage original semi-régulier (de niveau  $n$  et contenant  $m$  sommets) et en construisant à l’étape suivante, un nouveau maillage privé de tous les sommets insérés au niveau  $n$  (en vert sur la figure 4.5). On répète alors ceci pour l’ensemble de la hiérarchie, jusqu’au niveau le plus grossier, comme illustré sur trois niveaux à la figure 4.5.

Le traitement détaillé précédemment constitue la première étape du schéma lifting correspondant à la séparation des composantes paires et impaires. Sa complexité en temps d’exécution est en  $O(n.m)$  où  $n$  correspond au nombre de niveaux de décomposition et  $m$  au nombre de sommets du maillage initial. Mais sachant que  $n$  (qui dépasse très rarement 20) est largement inférieur à  $m$  (qui est de l’ordre d’une centaine de milliers), l’algorithme est en  $O(m)$ . De cette étape, sont déduites les phases de prédiction et de mise à jour, toutes deux réalisées également en  $O(m)$ .

#### 4.4.2 Classification des mesures ondelettes par la méthode du K-Means

Les arêtes, sommets ou facettes de chaque approximation de la hiérarchie (associés à une ou plusieurs des mesures ondelettes considérées, qualifiées de descripteurs) peuvent alors être classifiées par la méthode du K-Means (algorithme non supervisé), qui divise

les éléments en  $K$  groupes.

On considère ainsi un espace de dimension le nombre de descripteurs  $d$  étudiés (jamais supérieur à cinq dans notre cas), dans lequel on cherche à regrouper les éléments sous forme de  $K$  classes (ou clusters). Partant de  $K$  centroïdes (ou barycentres) initiaux choisis aléatoirement, l'algorithme itère entre deux étapes simples, jusqu'à ce que les centroïdes se stabilisent :

- chaque élément est assigné au cluster correspondant au centroïde le plus proche, en terme de distance euclidienne dans l'espace considéré.
- les centroïdes sont recalculés, à partir des éléments composant leur cluster.

Le nombre d'itérations utilisées en moyenne sur les objets usuels est de l'ordre d'une dizaine, expliquant entre autre les faibles temps d'exécution (reportés dans le tableau 4.1, même sur les objets les plus denses. À noter que cette classification est indépendante de la disposition spatiale des éléments.

À la fin de l'algorithme chaque sommet est associé à un cluster  $C_i$  (parmi  $K$ ) et une valeur de "rugosité"  $r_i$  ( $r_i$  est en fait un vecteur de  $d$  scalaires : un pour chaque descripteur) correspondant à celle du centroïde du cluster associé. Le nombre de clusters  $K$  est fixé par l'utilisateur. Nous nous sommes limités, dans ce manuscrit, à la classification en deux clusters, afin de séparer dans un premier temps les zones lisses (représentées en bleu sur toutes les figures présentant des résultats de classification) des parties rugueuses (en vert sur ces mêmes figures). Nous gardons la possibilité de distinguer les éléments sur un plus large panel de considérations en terme de rugosité, pour des travaux futurs.

Nous présentons à la section 4.5 les résultats obtenus en considérant principalement les moyennes de l'amplitude et de l'angle polaire sur l'ensemble de la hiérarchie. Ces mesures permettent en effet de bien distinguer les zones du maillage pour lesquelles la prédiction est très satisfaisante de celles pour lesquelles un traitement adapté pourrait produire de plus faibles coefficients. Pour chaque résultat de segmentation présenté, la distribution et le niveau de résolution considérés sont toujours rappelés.

#### 4.4.3 Segmentation initiale construite par croissance de régions

Une fois que les éléments du maillage ont été séparés en deux clusters, le but est de produire des ensembles de triangles de rugosité similaire, formant des régions spatiales connexes. Pour cela il suffit de faire passer l'information de classification portée par les éléments classifiés, vers les triangles. Lorsque les éléments sont des triangles, cette étape n'est pas nécessaire. Dans les deux autres cas, l'algorithme de croissance de régions et de labellisation de Lavoué *et al.* a été utilisé.

A partir d'une classification des sommets, chaque triangle dont les trois sommets appartiennent au même cluster est alors considéré comme triangle germe. Ces germes initient alors la création d'une nouvelle région qui est ensuite étendue (de façon itérative) aux triangles voisins d'arête commune avec un des triangles de la région grandissante, si le cluster du sommet en face de l'arête commune est celui de la région en cours. Cette règle a été adaptée si la classification est basée sur les arêtes ou les facettes.



Le processus décrit précédemment recommence pour chaque triangle germe non encore labellisé, jusqu'à ce qu'il n'y en ait plus un seul. Malheureusement, il reste souvent des triangles non labellisés, lorsqu'aucun des processus de croissance n'a pu les atteindre. Pour ces derniers, qui se situent généralement à cheval entre plusieurs régions, un mécanisme simple les intègre à la région associée à la plus grande longueur d'arêtes dans ce triangle.

#### 4.4.4 Amélioration de la segmentation en fonction de la règle d'agrégation considérée

La croissance de régions décrite dans les paragraphes précédents produit en général un grand nombre de partitions sur les objets naturels denses, surtout si le nombre de clusters est faible. Le nombre moyen obtenu sur le premier niveau de décomposition des objets usuels est d'environ 800 régions, pour une classification en deux clusters. La classification étant réalisable sur n'importe laquelle des décompositions de la hiérarchie, pour les approximations les plus fines, des stratégies différentes de celle initialement utilisée par Lavoué *et al.* ont été envisagées. Elles évitent ainsi des temps de calculs trop élevés, puisque l'on souhaite généralement obtenir une quinzaine de régions au maximum. Nous les exposons dans les paragraphes suivant, en différenciant les traitements associés à nos deux règles d'agrégation.

##### 4.4.4.1 Projection grossière de la segmentation "fine"

Lorsque l'on part d'une classification réalisée sur les niveaux les plus fins, l'étape de projection "grossière" est nécessaire pour permettre par la suite une analyse multi-résolution indépendante sur chacune des partitions, sans avoir à les remailler. Ce sont plus particulièrement les clusters qui sont considérés lors de la projection, pour éviter d'avoir à traiter trop de cas particuliers. Si l'on considère que la segmentation initiale a été réalisée au niveau de résolution  $n$ , la projection va commencer au niveau immédiatement plus grossier ( $n - 1$ ) et continuer jusqu'au niveau souhaité, sans jamais dépasser le niveau le plus grossier  $c$ .

La figure 4.6 clarifie le processus utilisé pour cette simplification de clusters. Le cluster d'appartenance de chaque triangle grossier ( $t$ ) est déterminé en fonction de celui de ses quatre facettes incidentes plus fines. Si au moins trois des quatre facettes appartiennent à un cluster donné, le triangle grossier correspondant aura alors la même étiquette. Un exemple de ce principe est illustré sur la figure 4.7, qui provient d'un zoom sur le modèle Horse. Si l'on se trouve en présence d'une égalité, il faut choisir lequel des deux clusters favoriser. Ceci dépend généralement de l'objectif final, c'est pourquoi les deux possibilités sont offertes. Nous avons tout de même choisi de favoriser le cluster non lisse (en vert, sur la figure 4.7), afin d'éviter la perte de hautes fréquences, surtout dans l'application qui consiste à ne pas considérer les ondelettes liées au cluster lisse.

Dans cette étape de simplification des clusters, il arrive souvent que de petites régions isolées soient créées, même si la tendance générale est d'éliminer les petites régions isolées de la segmentation initiale, comme celle observée sur la joue gauche du modèle "Venus" (première ligne de la figure 4.8). Si le nombre de facettes constitutives de ces petites partitions représente moins de 5% du nombre de facettes du modèle grossier, elles sont alors fusionnées avec la région ayant le plus grand nombre de frontières communes.

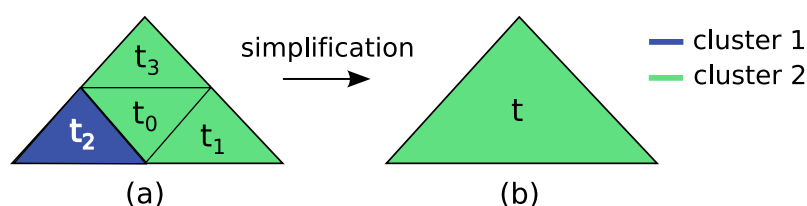


FIG. 4.6 – Exemple de la détermination du cluster d'appartenance d'une facette grossière (b) en fonction de ses quatre facettes filles (a).

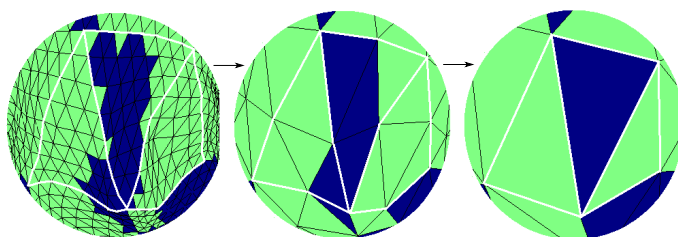


FIG. 4.7 – Exemple de la détermination du cluster d'appartenance pour un ensemble de facettes, après utilisation de notre règle de projection sur trois simplifications successives.

#### 4.4.4.2 Fusion de régions

Pour une classification réalisée sur un des niveaux les plus grossiers (contenant en moyenne de 80 à 800 sommets), la projection grossière n'est pas nécessaire puisque le niveau considéré est alors choisi pour être le niveau le plus grossier lors de la décomposition adaptative. Le fait de classifier des maillages moins denses va avoir tendance à réduire le nombre d'itérations lors de la classification (en moyenne 7,5) et aussi le nombre de régions créées après la croissance (en moyenne 18), donc les temps d'exécution de ces traitements sont également plus faibles. Néanmoins, certaines petites régions isolées peuvent être fusionnées par l'algorithme de Lavoué *et al.* Leur technique de fusion de régions, basée sur un graphe d'adjacence des régions, a pour objectif :

- de réduire la sur-segmentation résultant du mécanisme de croissance de régions ;
- de réduire la dépendance de l'algorithme au nombre et à la nature des clusters de courbure issus de l'algorithme de classification.

Le graphe d'adjacence des régions est alors défini de la façon suivante :

- à chaque noeud du graphe est associé une région produite par la phase précédente ;
- deux noeuds sont reliés entre eux si les deux régions associées sont voisines (relation d'adjacence). Ces noeuds sont valués et la valeur associée correspond à une distance de similarité calculée entre les deux régions et expliquée ci-après.

Une réduction du graphe est alors lancée, où la plus petite arête est éliminée à chaque itération, produisant la fusion des deux régions impliquées. Le nombre de régions est périodiquement mis à jour. Cette réduction se base sur la distance de similarité  $D_{ij}$  évoquée précédemment, qui regroupe la distance entre les deux régions pour la mesure étudiée durant la classification (courbure dans l'algorithme initial et rugosité pour notre adaptation), et tient également compte de leur aire et périmètre, afin de fusionner les petites régions englobées par de plus importantes.



La réduction du graphe s'arrête lorsque le nombre de régions actualisé atteint le nombre voulu par l'utilisateur ou lorsque la valeur de l'arête la plus faible est supérieure à un seuil défini par l'utilisateur. Ainsi cet algorithme permet d'obtenir une décomposition en un nombre fini de régions.

Le fait que cet algorithme prenne beaucoup de temps à s'exécuter sur les maillages denses possédant  $r$  régions (en moyenne 800 sur les modèles étudiés), réside dans la construction du graphe et sa mise à jour à chaque fusion. La construction est réalisée en  $O(r^2)$  au pire, où chaque région n'est jamais voisine de toutes les autres. La valeur associée à chaque arête du graphe tient compte des mesures de chaque descripteur. Les arêtes sont ensuite triées dans l'ordre croissant pour que l'étape de détermination de l'arête de distance minimale soit réalisée en temps constant lors de la mise à jour. Ainsi si un nombre important de fusions est nécessaire, la répétition de la mise à jour des valuations dans le graphe et de la nouvelle région d'appartenance des triangles correspondants peut aboutir à des calculs très longs.

#### 4.4.5 Projection finale vers l'objet semi-régulier d'origine

Pour les deux règles d'agrégations considérées précédemment, la segmentation obtenue sur l'un des maillages les plus grossiers de la hiérarchie doit enfin être "raffinée" pour que l'objet semi-régulier d'origine puisse être à son tour partitionné, permettant la décomposition indépendante des patchs résultants. Cette étape, réalisée en temps linéaire en fonction du nombre de facettes du maillage d'origine, attribue aux quatre facettes filles d'un triangle grossier les mêmes numéros de clusters que leur père. Cette règle est alors appliquée successivement pour chacun des niveaux jusqu'au modèle original. Notre implémentation, qui conserve chaque approximation, facilite alors l'application de ce raffinement de partitions (illustré par les deux dernières colonnes de la figure 4.8).

#### 4.4.6 Temps d'exécution des différentes étapes de la segmentation

Après l'explication de l'ensemble des traitements permettant d'aboutir à une segmentation de l'objet semi-régulier d'origine, à partir des deux règles d'agrégation, il est clair que la première règle demande un temps d'exécution plus important. C'est pour cette raison que nous indiquons les temps mis par les traitements incidents à cette première règle, sachant que la deuxième demande un moins grand nombre d'opérations, puisqu'elle s'applique sur un maillage moins dense.

Ces temps d'exécution sont reportés dans le tableau 4.1 pour plusieurs objets usuels de taille différente (précisée dans le tableau). Les expériences ont été menées sur un PC muni d'un processeur 64 bits AMD Athlon 3000+ (1,81 GHz), sous Windows. Les temps obtenus sont acceptables, puisqu'ils ne dépassent pas les 10 secondes pour chaque grande phase. Si l'étape de projection est la plus longue, c'est en partie parce que les temps indiqués considèrent les deux phases de projection, du plus fin au plus grossier, puis du plus grossier au plus fin. On remarque que la classification est plus importante lorsqu'un plus grand nombre de descripteurs sont considérés. Le temps indiqué pour cette étape tient compte du temps mis pour le calcul des moyennes sur la hiérarchie complète.

TAB. 4.1 – Temps d'exécution (en secondes) des différentes étapes de notre algorithme de segmentation, sur les objets remaillés par NM.

	Venus	Skull	Horse	Feline	Rabbit
Nb sommets originaux (nb décomp.)	163 842 (4)	131 074 (4)	112 642 (5)	258 046 (4)	70 658 (5)
Temps de calcul de l'analyse globale	1,797	1,25	0,782	4,531	0,485
Nb descripteurs pour la classification	1	2	1	1	1
Temps de classification des sommets	0,656	0,844	0,562	1,156	0,391
Temps de croissance de régions	0,109	0,078	0,078	0,187	0,047
Nb régions après la croissance	631	2317	410	846	326
Temps des projections	6,172	4,969	4,516	9,938	2,828
Nb régions après les projections	11	6	6	11	4
Temps d'exécution total	8,734	7,141	5,938	15,812	3,751

## 4.5 Résultats expérimentaux et applications

Nous avons comparé la classification et la segmentation produites par nos deux règles d'agrégation sur des décompositions denses et plus grossières de "Venus", "Horse", "Feline", "Bunny", "Dino" et "Skull", illustrées sur les figures qui suivent. Les classifications et segmentations présentées sont toujours basées sur la distribution normalisée de l'amplitude et/ou l'angle polaire des coefficients, moyennée sur l'ensemble de la hiérarchie pour nos deux règles d'agrégation.

Ces figures permettent une comparaison des segmentations produites par les deux méthodes d'agrégation, qui sont généralement proches. Une mesure de fidélité, comparant les segmentations sur l'approximation la plus fine et sur les modèles grossiers avant raffinement est donnée à titre indicatif dans le tableau présenté à la section 4.5.1. Ces mesures permettent d'apprécier quantitativement les différences entre les deux règles. De façon générale, la deuxième règle produit un plus faible nombre de régions.

Mais ce qui nous importe n'est pas tant de trouver des partitions qui caractérisent la rugosité, comme illustré au chapitre précédent, mais de séparer les régions pour lesquelles le pouvoir de la prédiction globale (utilisée dans un but de compression) est différent. C'est pourquoi nous considérons uniquement le schéma de subdivision Butterfly non lifté sur les deux types de remaillage (NM et MAPS), puisqu'il est le plus efficace en terme de compression.

Les résultats visuels obtenus pour les trois premiers modèles, mettent l'accent sur le fait que les segmentations produites par les deux règles sont plus éloignées pour le modèle "Venus" que "Horse" et "Feline". Ceci peut se justifier parce que la distance de séparation entre les régions lisses et rugueuses est plus petite sur "Venus". Par conséquent, les caractéristiques proches ont tendances à être fusionnées, alors que le corps et le haut des pattes (considérés lisses) séparent clairement les détails hautes fréquences pour les deux autres modèles (les pieds, la tête et les ailes).

Nous avons ensuite voulu comparer les différences des segmentations produites sur

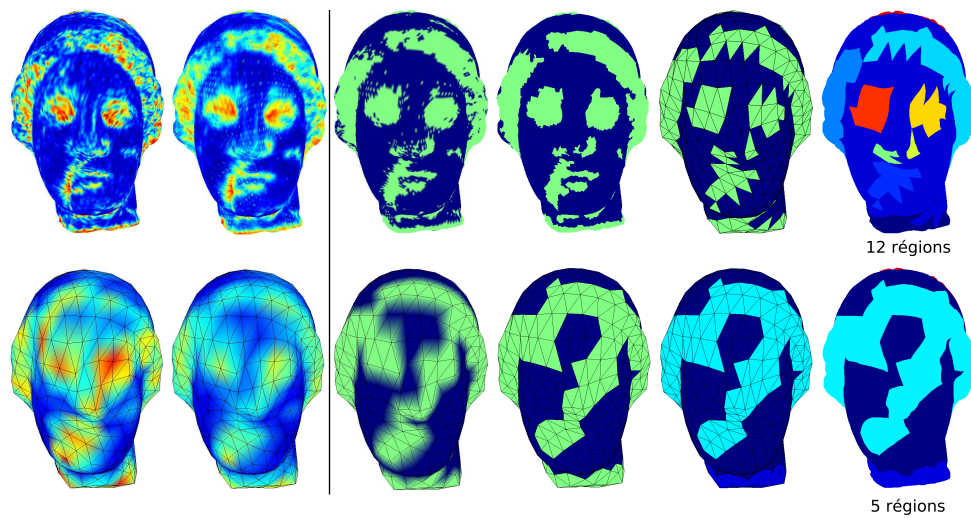


FIG. 4.8 – Distribution de l'amplitude normalisée des coefficients associée aux sommets (à gauche), sur une approximation fine (en haut) et grossière (en bas) de l'objet "Venus" remaillé par *NM*. La distribution présentée en première colonne est restreinte au niveau courant, tandis qu'une moyenne sur l'ensemble de la hiérarchie est ensuite considérée. Les grandes étapes de classification, croissance de régions et les projections, issues de cette dernière distribution sont enfin illustrées sur la partie droite.

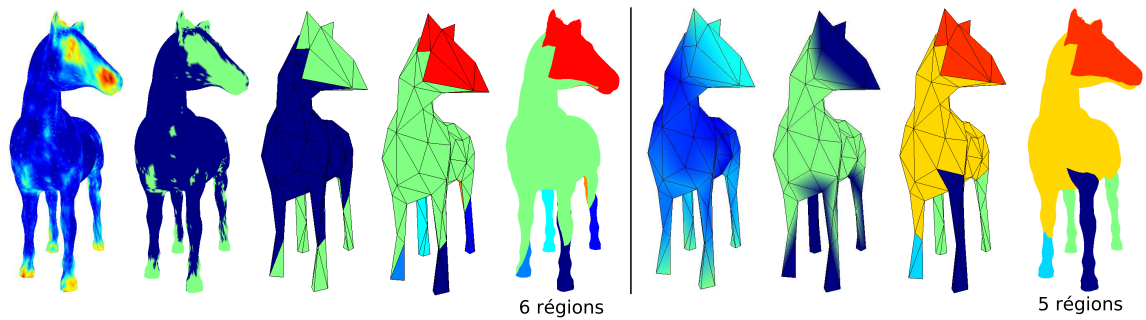


FIG. 4.9 – Distribution moyennée sur l'ensemble de la hiérarchie, de l'amplitude normalisée des coefficients, sur une approximation fine (à gauche) et grossière (à droite) de l'objet "Horse" remaillé par *NM*. Les grandes étapes de classification, croissance de régions et les projections, issues de ces distributions sont enfin illustrées sur la partie droite.

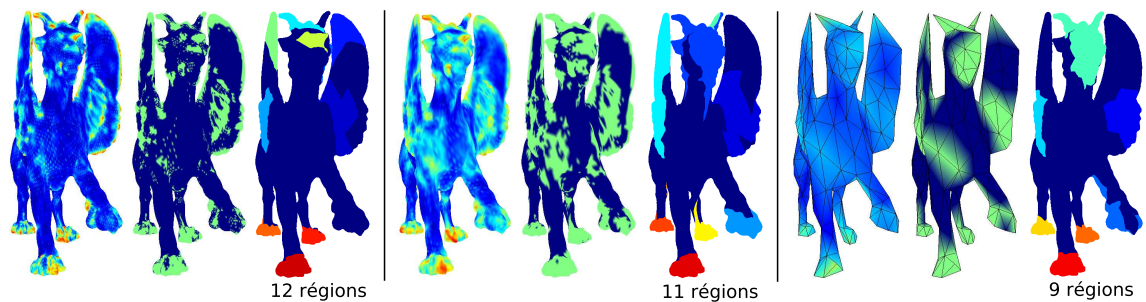


FIG. 4.10 – Etapes de la segmentation basée sur l'amplitude normalisée des coefficients, moyennée sur l'ensemble de la hiérarchie de l'objet "Feline" remaillé par *NM*. La moyenne est agrégée sur les deux premières approximations fines (à gauche et au milieu) et sur une version grossière (à droite). Le fait que la segmentation agrégée sur le second niveau soit meilleure est dû au nombre important de coefficients non normaux au premier niveau.

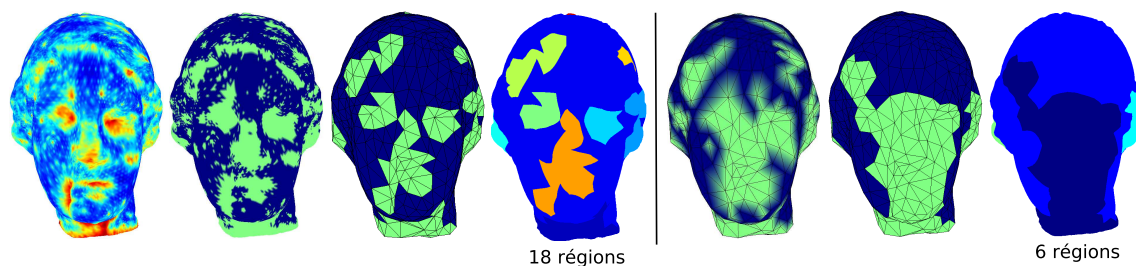


FIG. 4.11 – Comparaison de la segmentation basée sur l’amplitude normalisée des coefficients sur une approximation fine (à gauche) et grossière (à droite) de l’objet "Venus" remaillé par *MAPS*. L’image la plus à gauche représente la distribution moyennée sur l’ensemble de la hiérarchie. Pour le reste des traitements, les algorithmes cités précédemment (légèrement différents pour chaque règle), ont été utilisés.

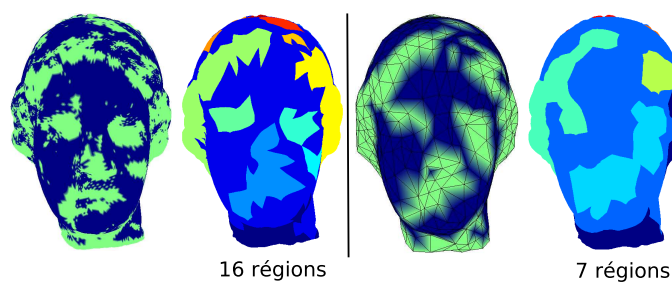


FIG. 4.12 – Classification et segmentation basées sur la composante normale et l’angle polaire des coefficients de l’objet "Venus" remaillé par *MAPS*. L’association de ces deux mesures a donné les meilleurs résultats en terme d’identification de la rugosité, en comparaison de ceux obtenus sur le maillage "normal" correspondant.

deux objets remaillés par *MAPS*, lorsque l’on considère uniquement l’amplitude des coefficients ou également l’angle polaire, dont la distribution est très variable sur l’ensemble de la surface. La considération de l’angle polaire produit ainsi une segmentation de l’objet "Venus" (figure 4.12) plus proche de celle obtenue à partir de l’objet "normal" (figure 4.8). Pour l’objet Bunny (figure 4.13), la deuxième règle permet de mieux identifier les régions à fortes courbures, puisque la notion de rugosité est plus nuancée.

Les deux dernières figures issues du remaillage *NM*, sont un peu particulières, puisqu’elles possèdent plus de coefficients non normaux sur l’ensemble de la hiérarchie que la normale. Ainsi il n’est généralement pas possible de procéder de la même manière qu’avec l’objet "Feline", sinon la segmentation utilisant la première règle se ferait à un niveau trop grossier, s’éloignant de nos objectifs. Nous avons donc considéré l’angle polaire lors des classifications.

Les comparaisons sur les différentes segmentations possibles d’un même objet sont pour l’instant très subjectives. Dans le chapitre suivant, nous comparons la compression adaptative sur ces différents partitionnements, ainsi le meilleur est celui qui produit les plus petits taux de compression.

#### 4.5.1 Statistiques sur les segmentations obtenues

Le tableau 4.2 compare les segmentations produites par les deux règles d’agrégation



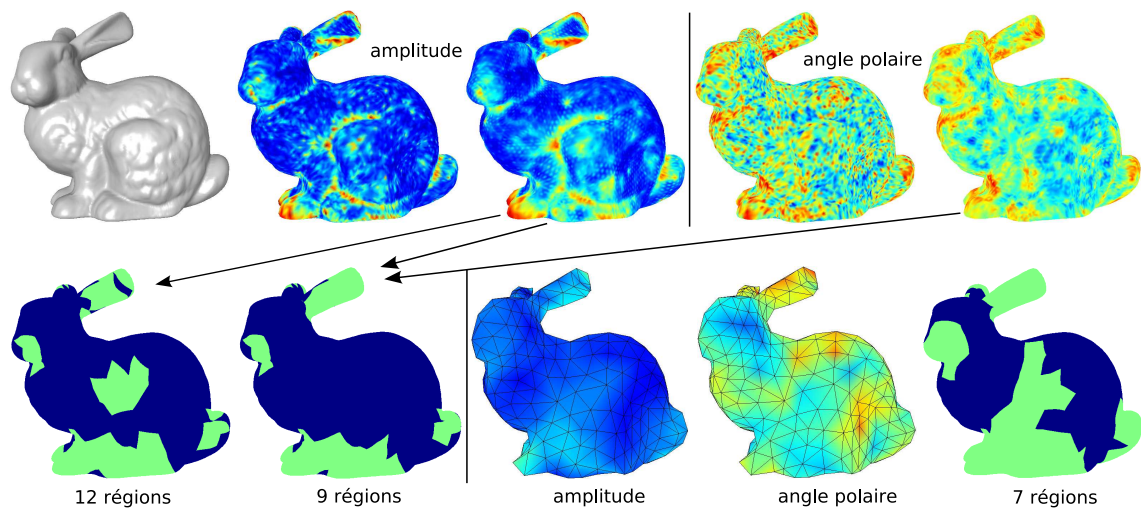


FIG. 4.13 – Etapes de la segmentation basée sur l’amplitude et l’angle polaire normalisés des coefficients, moyennés sur l’ensemble de la hiérarchie de l’objet Bunny remaillé par *MAPS*. La ligne du haut compare les deux distributions d’abord restreintes aux mesures sur le premier niveau d’approximation, puis moyennées sur l’ensemble de la hiérarchie. Nous comparons enfin sur la ligne du bas les classifications obtenues par la première règle d’agrégation (à gauche) et la seconde (à droite), pour laquelle l’association de l’amplitude et de l’angle polaire ont donné les meilleurs résultats.

sur les modèles usuels. Premièrement, la seconde règle produit toujours un moins grand nombre de régions, ce qui implique moins d’arêtes frontières de régions. Cette observation est intéressante pour la compression, pour laquelle les informations additionnelles induites par le codage indépendant des partitions seront alors moins importantes.

Cependant, les clusters produits par la seconde règle sont visuellement moins précis si on les compare à ceux produits initialement à partir de l’approximation la plus fine (dont l’image est illustrée au début de chacune des figures précédentes et qui sert de repère lors des calculs de justesse). Cette remarque est également confirmée par le taux de fidélité, reporté dans la colonne d’après celle indiquant le nombre de régions (tableau 4.2).

Nous avons calculé la "déviation" des classifications obtenues directement sur un modèle grossier ou après projection grossière (première règle d’agrégation). Nous l’évaluons par un pourcentage de fidélité calculé par rapport à la segmentation initiale sur l’approximation la plus fine considérée. Pour chaque modèle étudié, ce taux est toujours supérieur à 72%. Ainsi les dégradations produites ne sont pas si importantes et les résultats nous ont encouragé à utiliser les segmentations produites, comme entrée de notre "framework" adaptatif. Enfin, la répartition des clusters lisses et rugueux donne des résultats équivalents avec les deux règles.

#### 4.5.2 Evaluation de la segmentation

Sur les objets étudiés, notre méthode permet généralement de segmenter les singularités surfaciques, comme les yeux, la bouche, le nez, les cheveux . . . pour les modèles de visage ou la tête, la queue, les oreilles et les pattes pour les modèles d’animaux. A savoir que les résultats sont souvent plus précis en considérant le premier calcul d’agrégation.

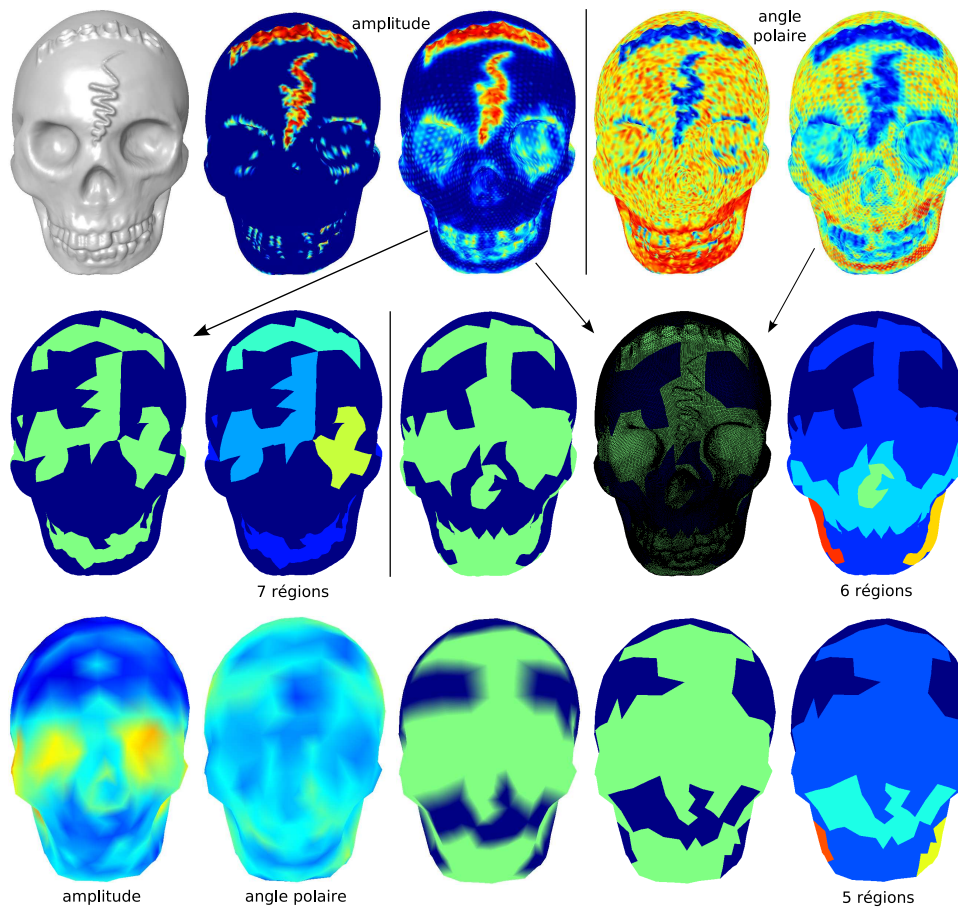


FIG. 4.14 – Etapes de la segmentation basée sur l'amplitude et l'angle polaire normalisés des coefficients, moyennés sur l'ensemble de la hiérarchie de l'objet "Skull" remaillé par *NM*. La ligne du haut compare les deux distributions d'abord restreintes aux mesures sur le premier niveau d'approximation, puis moyennées sur l'ensemble de la hiérarchie. Nous comparons (au milieu) les classifications et segmentations obtenues par la première règle d'agrégation. La dernière ligne présente le même type de résultats en considérant la seconde règle pour laquelle l'association de l'amplitude et de l'angle polaire ont donné les meilleurs résultats.



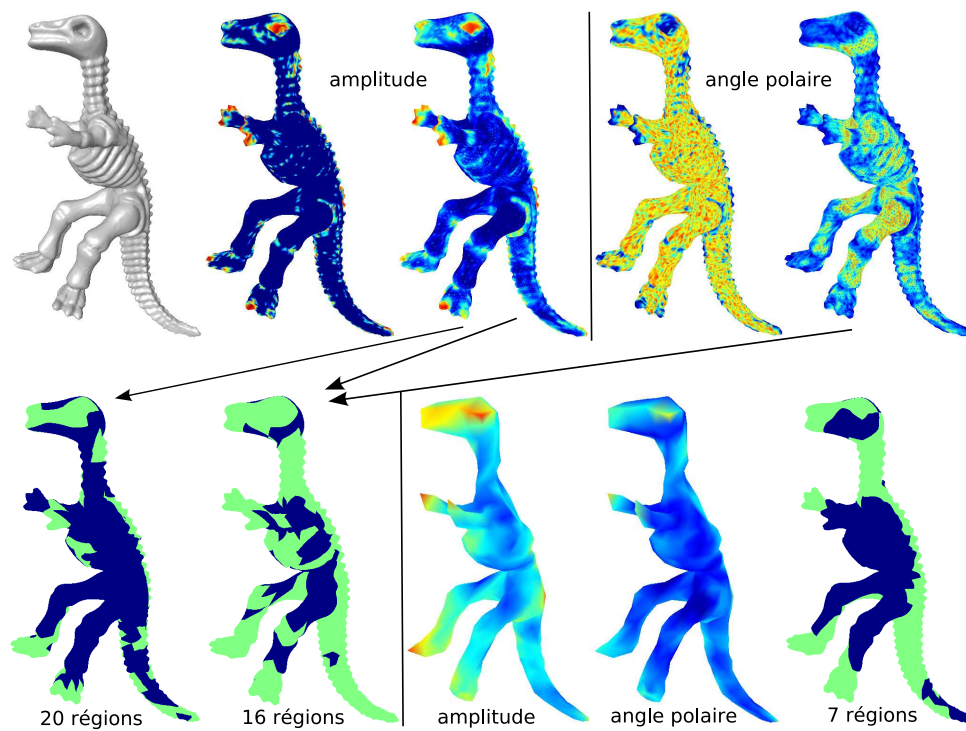


FIG. 4.15 – Etapes de la segmentation basée sur l'amplitude et l'angle polaire normalisés des coefficients, moyennés sur l'ensemble de la hiérarchie de l'objet "Dino" remaillé par *NM*. La ligne du haut compare les deux distributions d'abord restreintes aux mesures sur le premier niveau d'approximation, puis moyennées sur l'ensemble de la hiérarchie. Nous comparons enfin sur la ligne du bas les classifications obtenues par la première règle d'agrégation (à gauche) et la seconde (à droite), pour laquelle l'association de l'amplitude et de l'angle polaire ont donné les meilleurs résultats.

TAB. 4.2 – Statistiques issues de nos règles de segmentation sur les modèles usuels.

'#  $V_{or}$ ' : nombre de sommets du modèle original irrégulier, et '#  $V_{sr}$ ' : semi-régulier.

'# niv.' : nombre de niveaux de résolution. '# reg. 1' : nombre de régions produites par la première règle d'agrégation, et '# reg. 2' : par la seconde.

'% fidélité' : adéquation entre la classification grossière et celle calculée sur l'approximation la plus fine.

'% rug.' : pourcentage de triangles non lisses dans la classification grossière sous-jacente.

'% front.' : pourcentage des frontières de clusters à partir de la même classification.

	# $V_{or}$	# $V_{sr}$	# niv.	# reg. 1	% fidélité	% rug.	% front.
Venus NM	50 002	163 842	4	11	89%	30%	13%
Venus MAPS	50 002	198 658	4	16	82%	47%	7%
Rabbit NM	67 039	70 658	5	4	75%	38%	22%
Rabbit MAPS	67 039	107 522	5	4	81%	29%	13%
Horse NM	48 485	112 642	5	6	84%	27%	8%
Feline NM	49 919	258 046	5	11	79%	33%	13%
Skull NM	20 002	131 074	4	6	92%	48%	12%

	# reg. 2	% fidélité	% rug.	% front.
Venus NM	5	80%	38%	10%
Venus MAPS	7	73%	43%	10%
Rabbit NM	3	75%	15%	8%
Rabbit MAPS	3	77%	27%	12%
Horse NM	5	76%	36%	8%
Feline NM	9	76%	27%	9%
Skull NM	2	73%	27%	7%

gation proposé. Sur l'objet Feline, les parties fortement courbées des bords des ailes (par exemple) ne sont pas segmentées, mais ceci est sûrement dû au fait que ces fortes courbures se retrouvent sur le polyèdre le plus grossier et ne sont ainsi pas interprétées comme hautes fréquences dans les niveaux de décomposition. A l'inverse, les fortes courbures sur les extrémités des cornes (constituant des détails plus fins) sont par contre prises en compte. Notre méthode a en effet tendance à privilégier la détection des hautes fréquences que l'on retrouve sur une majorité de niveaux de décomposition, mais pas les petits détails isolés sur un seul niveau.

Comme plusieurs auteurs l'ont déjà fait remarquer, la segmentation de maillages concerne un grand nombre d'applications et fait intervenir de nombreuses méthodes ayant des critères variés. Attene et al. [4] remarquent par exemple la difficulté d'évaluation d'une méthode de segmentation étant donné les contextes d'utilisation variés. De plus, Delest [20] rapporte que l'évaluation de la segmentation en patchs surfaciques rentre dans le processus global d'évaluation des résultats de l'application visée. Dans notre cas précis, la segmentation mise en place est utile à la compression adaptative, où des schémas, des pas de quantification ou des types différents de codage pourront être appliqués sur les régions produites. Ainsi, la qualité de la segmentation pourra s'apprécier lors de la décomposition locale, présentée au chapitre suivant.

## 4.6 Conclusion

Nous avons présenté notre nouvelle méthode de segmentation un peu différente des approches considérées jusqu'à présent, en ce sens qu'elle se base sur les informations haute-fréquence portées par l'amplitude et l'angle polaire des coefficients d'ondelettes. Elle découle des schémas d'analyse étudiés au chapitre précédent, qui ont tendance à séparer les régions surfaciques lisses de celles présentant un aspect rugueux.

Nous présentons ainsi deux méthodes différentes consistant à produire une moyenne de l'ensemble des coefficients de chaque niveau de résolution pour agréger ces mesures sur l'un des polyèdres d'approximation. Ainsi il nous a été possible de considérer une adaptation de la méthode de segmentation de Lavoué *et al.* [63]. Ces agrégations sont respectivement calculées à partir du maillage le plus fin ou le plus grossier de la décomposition. Les résultats de segmentation présentés sur les modèles considérés sont relativement proches du point de vue des deux approches citées. Sur l'ensemble des objets à disposition, les partitionnements produits par la seconde considération sont généralement moins précis, mais contiennent un plus petit nombre de régions. Les deux méthodes ont ainsi leurs avantages selon l'application visée.

Les différentes segmentations produites et illustrées à la fin de ce chapitre vont maintenant servir comme entrée de notre "framework" d'analyse multirésolution adaptative, détaillée au chapitre suivant. Ces segmentations ne peuvent pas toujours être interprétée en terme de séparation de parties caractéristiques puisqu'elles servent principalement à adapter localement la compression dans les régions produites. Malgré tout, la différenciation fréquentielle produite par la première règle permet souvent un repérage des parties caractéristiques de l'objet (en différenciant par exemple la tête, les pattes et le corps des animaux ou les éléments caractéristiques des visages, surtout ceux remaillés par NM). Notre méthode pourrait ainsi servir dans un but d'indexation de ces objets.



# Décomposition adaptative de maillages surfaciques

## 5.1 Introduction

Nous proposons dans ce dernier chapitre, un algorithme d'analyse multirésolution basé sur la segmentation de l'objet en régions plus simples, telle que décrite au chapitre précédent. Cet algorithme a été intégré dans une chaîne complète de compression/décompression adaptative, pour permettre la décomposition en ondelettes et le codage de chaque partition de manière indépendante. Ce "framework" adaptatif, basé sur un partitionnement préalable peut également servir à d'autres applications comme la transmission ou la visualisation sélectives, champs d'investigation actuels qu'un grand nombre de travaux a abordé. Nous évoquons dans la première section de ce chapitre les principales techniques pionnières dans ces domaines, pour finir par quelques unes des méthodes les plus prometteuses, basées sur un partitionnement surfacique, dans le but de les comparer avec les algorithmes que nous proposons.

En effet, contrairement aux techniques d'analyse multirésolution globales évoquées au chapitre 2, les méthodes récentes que nous analysons ci-après utilisent généralement un partitionnement pour optimiser l'allocation binaire de chaque partie en fonction de sa contribution à la distorsion globale, qu'elles cherchent à minimiser.

Dans un second temps, nous détaillons les grandes étapes et les différentes possibilités offertes par notre "framework" lors de cette analyse indépendante de chaque région. Pour celles-ci, le meilleur schéma d'analyse multirésolution adapté à leur aspect surfacique peut être choisi et appliqué. Ainsi nous détaillons une solution envisagée pour le traitement spécifique des zones non lisses pour lesquelles les schémas de subdivision ne sont pas bien adaptés. Il est également possible de quantifier chaque patch en fonction de sa contribution visuelle à l'ensemble de la surface. Les résultats obtenus en termes de compression sont enfin présentés dans la dernière section (courbes débit/distorsion), ainsi que les adaptations nécessaires pour s'orienter vers la transmission, la visualisation sélectives ou encore la correction d'erreurs lors de la transmission, dans un canal peu fiable, d'un flux 3D. Ces travaux ont été soumis à la revue internationale IEEE Transactions on Multimedia.

## 5.2 Compression par parties pour la transmission et la visualisation sélectives

Les algorithmes d'analyse multirésolution décrits au chapitre 2 compressent les objets entièrement pour réduire l'espace de stockage et le temps mis pour les transmettre sur les réseaux. Cependant, de nos jours, un grand nombre d'applications interactives ont besoin de transférer des objets 3D par Internet entre un serveur et plusieurs clients. On pourra penser à l'apprentissage à distance ou aux jeux vidéos interactifs sur Internet, pour lesquels les techniques de transmission et de rendu de ces objets 3D (de plus en plus détaillés) doivent être rapides et efficaces. Pour ces nouvelles applications, des techniques de compression partielle et de visualisation sélective ("view dependent") sont actuellement considérées. Ces approches permettent généralement d'accélérer le rendu pour une qualité visuelle équivalente, mais aussi de ne pas encombrer la bande passante ni de saturer les ressources utilisées pour le décodage (qui peuvent être restreintes).

Un grand nombre de méthodes de simplification ou de raffinement sélectives ont été proposées dans la littérature pour s'adapter en temps-réel aux paramètres de vision. Elles ont d'abord été élaborées sur des modèles de terrain, des surfaces paramétriques (B-splines ou NURBS), puis sur les maillages irréguliers ou à connectivité de subdivision. De la même façon, les textures peuvent aussi être transmises de façon à s'adapter au point de vue.

Nous détaillons dans la section suivante celles qui proposent une méthode de compression basée sur un partitionnement préalable de la surface, en vue d'une reconstruction sélective. Le partitionnement permet alors en plus des méthodes pionnières de raffinement sélectif (Hoppe [46] puis Gioia *et al.* [35] respectivement pour les maillages irréguliers sous forme de maillages progressifs et semi-réguliers par analyse multirésolution), une adaptation locale de l'allocation binaire, pour de meilleurs résultats en termes de compression.

Pour cela, le serveur partitionne l'objet et chaque région est envoyée individuellement ou séquentiellement au client de façon à optimiser leur résolution en fonction de leur visibilité, dépendant du point de vue du client. Pour finir, ces dernières méthodes sont généralement plus robustes en comparaison de l'approche globale, ce qui fournit un signal plus résistant aux erreurs lors de la transmission.

### 5.2.1 Compression sans perte

Parmi les méthodes pionnières de visualisation sélective, les travaux de Hoppe [46] ont été introduits pour faciliter l'affichage des très gros objets (de plus de 100 000 faces). Pour cela une reconstruction adaptative est employée, où différents niveaux de résolution co-existent au sein de la surface. L'approche considérée prend en compte le fait qu'au moment du rendu d'une scène, les facettes des objets situées hors du champ de vue sont éliminées par le pipeline graphique. Il n'est alors pas nécessaire de les raffiner. Dans cette même optique d'accélération du rendu, les niveaux de résolution (la distorsion) sont adaptés en fonction de la distance de l'objet à la caméra et de sa projection sur l'écran, où les raffinements doivent être plus denses au niveau de la silhouette de l'objet (endroits où la normale de la surface est perpendiculaire à la direction de vue) pour un



rendu réaliste.

Cette méthode permet ainsi d'adapter le maillage incrémentalement en temps réel, par rapport aux changements des paramètres de vue (cône de vision, orientation de la surface et erreur géométrique dans l'espace écran). Pour respecter ce dernier paramètre, l'erreur géométrique calculée sur le maillage projeté à l'écran ne doit pas dépasser en tout point un seuil de tolérance (qui peut être fixé par exemple à 0,5 pixel). L'adaptation des niveaux de résolution est alors possible en utilisant les maillages progressifs *PM* [45], obtenus grâce aux opérations de séparation de sommet (pour le raffinement du maillage) et de contraction d'arête (pour la simplification). Ces opérateurs peuvent alors s'appliquer localement si l'ordre d'application respecte les dépendances entre sommets voisins.

Après avoir exposé les grands principes de la visualisation sélective, intéressons-nous aux nouvelles méthodes profitant d'une segmentation préalable des maillages. En 2005, Chen et Georganas [14] ont proposé une technique de compression monorésolution basée sur une segmentation en régions significatives pour la transmission sélective.

Leur méthode de segmentation par ligne de partage des eaux se base sur l'estimation de la courbure Gaussienne. Les partitions sont alors délimitées par les sommets ayant un comportement hyperbolique du point de vue de la courbure (chaque composant a alors un comportement elliptique ou parabolique). Une estimation de la convexité/concavité des sommets est également utilisée pour une meilleure segmentation des zones situées autour des sommets convexes ou concaves. Enfin les auteurs ont considéré un voisinage élargi par rapport aux techniques habituelles où un voisinage "1-ring" est généralement utilisé [127]. Cette approche évite ainsi la sur-segmentation ou la construction de frontières erronées sur les maillages haute-résolution pour lesquels l'échantillonnage est très dense.

Chaque région contruite est alors compressée séparément grâce à l'algorithme monorésolution Edgebreaker [98], puis l'ensemble des patches compressés est regroupé sous forme d'un unique flux. Les bandes de triangles communes aux frontières des régions (utilisées pour les reconnecter entre elles) sont encodées par la suite et concaténées en fin de flux. Le décodeur peut alors disposer de chaque région individuellement mais aussi restaurer l'objet entier grâce aux bandes de triangles. Une fois le flux transmis, le client peut alors demander certaines parties en particulier, que le décodeur décompresse séparément. Les informations additionnelles par rapport à l'algorithme Edgebreaker utilisé globalement proviennent de la séquence des frontières encodées séparément et de l'ajout d'en-têtes, n'engendrant pas un surcoût conséquent, pour des taux de compression quasi-similaires.

Plus récemment, Cheng *et al.* [15] ont développé le même style de méthode à partir d'une segmentation en régions significatives, pour un accès sélectif et progressif des maillages. Les applications visées sont la transmission adaptative de grands volumes de données et le rendu sélectif. L'accès aux parties significatives combiné à la progressivité de la décompression permettent une visualisation efficace même si la bande passante ou la mémoire sont limitées. Leur technique de décomposition du maillage est également basée sur la détection des parties saillantes de l'objet (contours ou discontinuités concaves) représentant les frontières de régions. Pour cela la courbure minimale est es-

timée sur l'ensemble de l'objet, puis des seuils permettent la formation de régions (tous les sommets dépassant un seuil sont connectés).

Chaque composant est ensuite encodé progressivement sans perte grâce à une version améliorée de l'algorithme de Alliez *et al.* [1]. L'algorithme d'origine utilise une prédiction barycentrique ainsi qu'un repère de Frenet afin d'exprimer le résidu sous forme de composantes normale et tangentielle. Ces dernières sont alors quantifiées en utilisant un pas de quantification global uniforme. Partant de l'observation que les maillages semi-réguliers lisses ont leur composante normale plus importante que les composantes paramétriques, ceci grâce au remaillage effectué préalablement, les auteurs proposent de tenir compte de l'influence de la paramétrisation pour le codage des coordonnées. Pour cela, ils opèrent une seconde transformation des coordonnées dans un repère sphérique composé des angles  $\theta$  et  $\phi$ . Pour exploiter le fait que généralement la distribution de l'angle polaire  $\theta$  n'est pas uniforme, une quantification différente est alors utilisée pour différencier la composante normale des composantes tangentielles. Les gains obtenus en termes de compression géométrique sont compris entre 4 et 20% par rapport à la méthode classique [1].

Cet algorithme de compression progressive est alors utilisé pour coder chaque patch indépendamment, afin de pouvoir décoder localement chaque partie à des niveaux de détails différents. Le codage arithmétique de chaque composant (représenté sous forme d'arbre hiérarchique des niveaux de résolution) permet alors une transmission progressive de chaque patch. La méthode de décompression et de visualisation sélective proposée utilise une approche simple permettant d'estimer la visibilité de chaque composant à partir de sa boîte englobante (pour un aperçu général de sa forme). Ainsi, pour un point de vue donné, les boîtes englobantes sont triées en fonction de la distance de leur centre à la caméra. Les partitions les plus proches seront alors décompressées en premier et plus raffinées que les autres, les parties non visibles restant grossières. Tout au long du processus de visualisation, lorsque le point de vue bouge, les niveaux de résolution sont incrémentés ou décrémentés en fonction du contexte.

### 5.2.2 Compression progressive basée sur la décomposition en ondelettes

Par rapport à la méthode de Hoppe décrite précédemment pour la visualisation sélective, l'algorithme de Gioia [35] permet une reconstruction adaptative (en termes d'espace et de fréquence) à partir d'un encodage progressif des coefficients d'ondelettes par zerotree (compression définie dans la partie AFX [87] de MPEG-4). L'avantage est de proposer une transmission (serveur/client) et une navigation sélectives temps-réel dans des grands volumes de données. Pour cela la méthode utilisée s'adapte aux capacités des terminaux et au débit du réseau permettant les échanges client/serveur.

Le modèle utilisé se base sur des mises à jour locales de la scène de façon adaptative et périodique, pour une bonne qualité de navigation. Pour cela, l'ajout ou le retrait de coefficients d'ondelettes sur un maillage partiellement reconstruit va modifier localement la structure hiérarchique, de façon à produire une reconstruction optimale (dépendant de la vue) et ne pas surcharger l'espace de stockage du terminal. Ainsi les coefficients sont catégorisés en fonction de leur nécessité, évaluée en fonction de la visibilité du sommet associé, de la vitesse de navigation, de la résolution de l'écran et du processeur du

terminal utilisateur. Le serveur est alors capable de déterminer efficacement les portions (ou paquets) de la représentation binaire correspondant à des régions d'intérêt grâce à des marqueurs ajoutés à la structure en zerotrees.

Du côté client, après avoir décodé les portions pour en extraire les coefficients d'ondelettes, ceux-ci sont associés aux arêtes correspondantes du maillage de base qu'ils raffinent. Le client envoie alors périodiquement des informations sur ses paramètres d'affichage (point de vue, direction et angle de vue) et ce qu'il a actuellement en mémoire cache (permettant de conserver les données les plus appropriées, afin de minimiser les transmissions multiples de la même donnée, pour une même qualité de rendu). En fonction de ces informations, le serveur sélectionne la portion de la représentation encodée nécessaire à la visualisation et envoie seulement les données qui ne sont pas déjà en cache client.

Dans le cas où le nombre de clients serait critique et le serveur ne pourrait plus gérer sa tâche, elle sera déportée au client qui lui enverra alors sous forme de requête ce dont il a besoin en fonction de son point de vue. Une implémentation multithread pour des applications de visualisation interactive permet de disposer de processus indépendants et asynchrones pour la reconstruction de maillages, le rendu 3D et les dialogues réseaux pour une navigation plus efficace.

En 2005, Sim *et al.* [110] ont développé une méthode de compression basée sur un partitionnement préalable en segments pour améliorer le rapport débit/distorsion tout en proposant une transmission sélective en fonction du point de vue de l'utilisateur. Cette approche considère en entrée des maillages normaux semi-réguliers (obtenus grâce à un remaillage préalable décrit à la section 2.6.2 de ce document). De la même façon que les méthodes de compression par parties décrites précédemment à la section 5.2.1, chaque partition est encodée indépendamment en fonction de ses caractéristiques locales, mais cette fois-ci grâce aux ondelettes. De cette façon, la trame binaire correspondant à chaque segment peut être tronquée à n'importe quel moment lors de la transmission. Une mesure de visibilité est alors calculée pour chaque segment, afin de déterminer l'ensemble de tronçons optimal, maximisant la qualité de reconstruction pour un point de vue donné.

Selon les auteurs, les taux de compression obtenus par les algorithmes traditionnels de compression par ondelettes (comme CNM [56] pour les maillages normaux) peuvent être améliorés en exploitant les caractéristiques locales des coefficients d'ondelettes. Ils font remarquer que contrairement aux maillages irréguliers, les maillages semi-réguliers peuvent être partitionnés plus facilement en profitant par exemple de la structure d'arbres basée arêtes utilisée pour le codage zerotree des coefficients. Ainsi si l'on considère la relation de descendance illustrée par la figure 5.1, où le noeud  $v_i^l$  est parent des quatre noeuds  $v_{i,j}^{l+1}$  ( $1 \leq j \leq 4$ ) de résolution supérieure, il est alors possible de construire un partitionnement disjoint pour l'ensemble des feuilles considérées au niveau  $l + 1$  ou à un niveau supérieur (la figure illustrant un seul raffinement à titre d'exemple). Chaque arbre constitue alors un segment dans le maillage normal considéré, mais comme le montre la figure 5.1, les trois segments définis à partir des racines  $v_r^l, v_s^l$  et  $v_t^l$  s'intersectent au sein du triangle  $(v_e^0, v_f^0$  et  $v_g^0)$ , empêchant une localisation "compacte" des segments. Pour cela les auteurs ont proposé deux nouvelles structures d'arbres, permettant de remédier aux problèmes d'intersection, pour des seg-

ments plus compacts adaptés à tous les types d'irrégularités des sommets et produisant une meilleure qualité visuelle après transmission sélective.

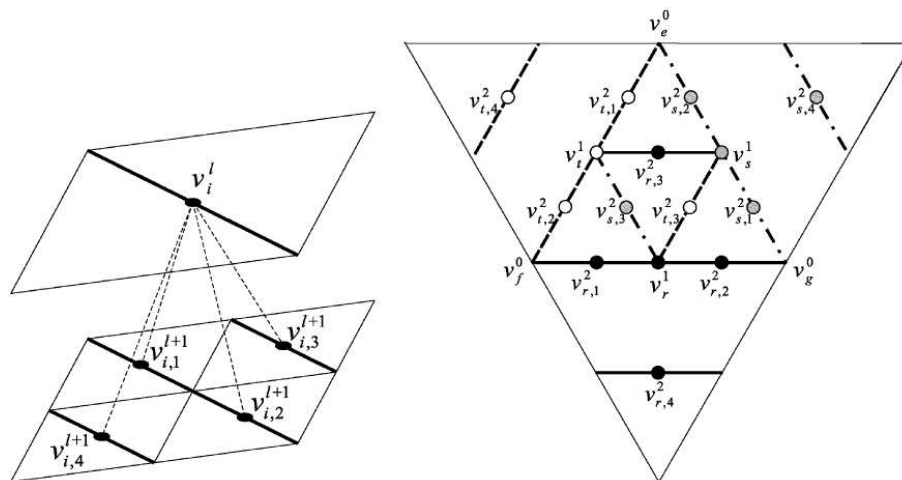


FIG. 5.1 – A gauche : racine d'un zerotree et sa descendance dans le niveau de résolution immédiatement plus fin. A droite : couvertures de trois zerotrees ayant pour racine les noeuds  $v_r^l$ ,  $v_s^l$  et  $v_t^l$  et représentés par différents niveaux de gris. Schéma tiré de [110].

Il est alors possible de déterminer le nombre optimal de bits à allouer à chaque segment (représenté sous forme de trame binaire encodée par *SPIHT*) afin de minimiser la distorsion géométrique globale pour un débit cible. Pour cela, les auteurs utilisent la méthode des multiplicateurs de Lagrange, approche de minimisation utilisée également par Payan *et al.* [90, 91] (détaillée à la section 2.8.2.2 de ce document) pour l'optimisation du compromis débit/distorsion, afin d'améliorer les taux de compression de l'algorithme *CNM* [56], tout comme l'algorithme de Sim *et al.*. Nous reviendrons plus précisément sur ces points, comparés avec l'approche de Payan *et al.* [90, 91] à la section 5.3.5.1.

Cette méthode qui peut également être utilisée pour des applications de transmission et visualisation sélectives, afin d'allouer la majeure partie des bits aux segments visibles, déterminés grâce aux paramètres de vision du client, envoyés au serveur. Ces nouveaux paramètres sont alors intégrés à la mesure de distorsion géométrique, afin de tenir compte des critères de visibilité dans la recherche d'optimisation du débit de chaque segment. Dès que le point de vue de l'utilisateur change, les critères de visibilité sont alors mis à jour et l'optimisation est recalculée de telle sorte que de nouveaux paquets puissent être envoyés si de nouvelles régions deviennent visibles. Les résultats de simulation démontrent que ce procédé permet de réduire considérablement la bande passante tout en maintenant une bonne qualité visuelle. Ainsi pour un point de vue fixe et une même qualité, la méthode sélective engendre une diminution de plus de 50% du débit par rapport à l'algorithme non sélectif. Enfin pour des variations dynamiques du point de vue (rotation de la caméra d'un angle de  $\pi/3$  rad/s autour de l'objet Venus), les détails des parties non visibles sont reconstruits graduellement en maintenant une bonne qualité visuelle, permettant d'envisager le traitement d'objets plus denses.

Dans un autre contexte, Elkefi *et al.* [26] ont proposé en 2004 une méthode de compression de maillages 3D de très grande résolution, par transformée en ondelettes au "fil de l'eau". Le principe de cette technique est de minimiser les ressources mémoires utili-

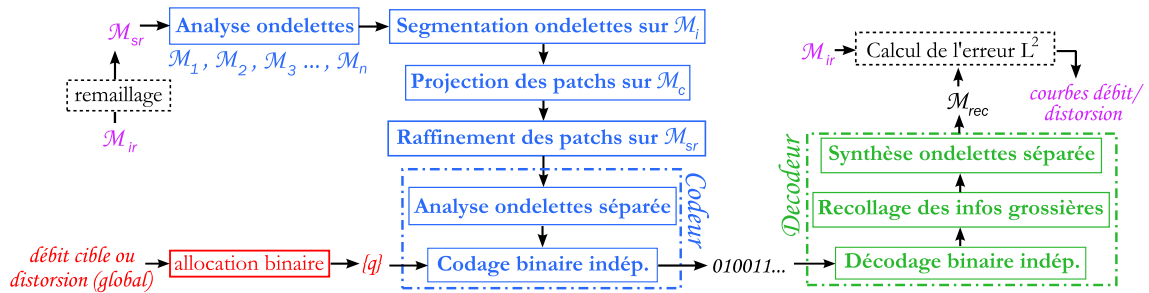


FIG. 5.2 – Principales caractéristiques et étapes de notre algorithme de compression adaptative, qui a pour but de coder localement un maillage semi-régulier  $M_{sr}$  (produit par remaillage de l'objet irrégulier d'origine  $M_{ir}$ ). Ce traitement permet une reconstruction  $M_{rec}$  robuste et efficace du côté client.

sées pour le chargement et le traitement de très gros volumes de données (qui peuvent être composés de plus d'un million de sommets). L'utilisation d'une transformée en ondelettes basée sur le schéma lifting et utilisant des filtres d'analyse locaux rend alors possible cette compression au "fil de l'eau". Pour cela, une procédure d'acquisition en spirale des données permet de traiter l'objet région par région, sans avoir besoin d'un chargement complet de celui-ci en mémoire.

## 5.3 Principes de notre algorithme de compression adaptative

### 5.3.1 Schéma général de notre "framework"

Notre nouveau "framework" d'analyse multirésolution a été conçu pour proposer des traitements différenciés de chacun des patches (décomposition, quantification, codage et allocation binaire), dans le but d'améliorer les taux de compression sur des objets naturels. Ce "framework", schématisé par la figure 5.2, considère en entrée des modèles semi-réguliers  $M_{sr}$ . Il commence par détecter l'hétérogénéité des coefficients d'ondelettes, produits par la décomposition globale de  $M_{sr}$  en  $n$  maillages plus grossiers  $M_1, M_2 \dots M_n$ , ce qui aboutit à la méthode de segmentation détaillée au chapitre précédent.

Les régions connexes résultantes peuvent alors être traitées différemment, afin de ne plus avoir un ensemble d'informations hétérogènes à coder. C'est à ce moment là qu'intervient notre algorithme d'analyse multirésolution adaptative, que nous détaillons dans ce chapitre. Son but est d'optimiser la transformation en ondelettes, la quantification et l'allocation binaire de chaque partition (en fonction d'un débit ou d'une distorsion cible). Cet algorithme est également capable de s'adapter à n'importe quel autre type de segmentation d'entrée. Il sera alors nécessaire d'indiquer explicitement les schémas à considérer pour chaque région, si la segmentation considérée n'identifie pas clairement pour chacune d'elle si elle correspond plutôt à une surface lisse ou rugueuse.

Du côté client, après un décodage entropique de chaque patch, les morceaux constituant le maillage le plus grossier sont d'abord "recollés" avant de pouvoir appliquer la synthèse ondelettes pour reconstruire l'objet d'origine. Il est alors intéressant de comparer la qualité de reconstruction produite pour une taille de fichier de codage bien précise.

Par rapport aux méthodes de compression présentées précédemment, nous proposons de profiter de la segmentation préalable en patches connexes pour différencier non seulement la quantification des coefficients ou l'allocation des bits pour chaque partition, mais également pour permettre l'application (en amont) de différentes décompositions en ondelettes sur cet ensemble de régions.

Dans la suite de cette section, nous détaillons chaque grande étape intervenant dans les phases d'analyse et de synthèse locales. L'analyse locale traite en entrée les maillages issus de la segmentation produite au chapitre précédent. Nous en expliquons tout d'abord chacun des grands principes, avant de détailler ceux nécessaire au décodage sous-jacent.

### 5.3.2 Principe de l'analyse en ondelettes séparée sur chaque patch

Cet algorithme considère la segmentation de l'objet en régions connexes, sur lesquelles une décomposition indépendante peut être réalisée. L'analyse indépendante des patches peut être différenciée pour chaque cluster, afin de séparer les traitements en fonction de l'aspect lisse ou rugueux de la surface, mais il est également possible d'appliquer une décomposition spécifique sur chaque partition, en fonction de son niveau moyen de fréquences.

Cette décomposition adaptative va alors produire autant de fichiers ondelettes qu'il existe de régions, étant donné que le codeur des coefficients d'ondelettes que nous avons utilisé ne peut pas traiter directement un cluster (composé de plusieurs parties connexes), mais uniquement un maillage manifold connexe ouvert ou fermé. Un autre fichier est enfin nécessaire pour le décodage, il sera désigné par la suite "fichier auxiliaire". Il contient le nombre de patches à recevoir pour pouvoir reconstruire l'objet et pour chacun d'entre eux, à quelle classe il appartient (lisse ou rugueuse), ainsi que d'autres informations détaillées à la section 5.3.2.2. Les résultats en termes de débit/distorsion présentés par la suite considèrent l'ensemble de ces informations pour calculer les taux de compression de la méthode locale.

#### 5.3.2.1 Format utilisé pour hiérarchiser les ondelettes de chaque patch

L'outil de codage progressif des coefficients d'ondelettes que nous avons utilisé a été introduit par Khodakovsky *et al.* [58] pour les maillages. Il repose sur le codage SPIHT basé arêtes, d'abord introduit pour le traitement d'images, puis adapté aux maillages (comme nous l'avons vu à la section 1.6.2). Il utilise une représentation progressive sous forme de zerotree définie sur les arêtes des maillages multirésolution, car chacune est parente de quatre arêtes de même orientation dans le maillage immédiatement plus fin.

Pour réaliser ce codage (exploitant les corrélations entre les coefficients de niveaux de résolution différents), les fichiers ondelettes résultant de notre analyse en ondelettes locale doivent alors respecter le format ASCII "DAT" [51] défini et utilisé par Khodakovsky *et al.* comme entrée de leur codeur zerotree. Ce format possède une structure similaire au format VRML, dont un exemple est donné à la figure 5.3, produit des tailles de fichiers plus importantes qu'en utilisant les formats habituels (VRML, OFF, OBJ ...). Ceci s'explique parce qu'il mentionne l'ensemble des triangles de chaque niveau de résolution, afin de facilement détecter la notion de filiation entre les arêtes multirésolution, exploitée par le codeur zerotree. L'information géométrique des sommets du maillage grossier



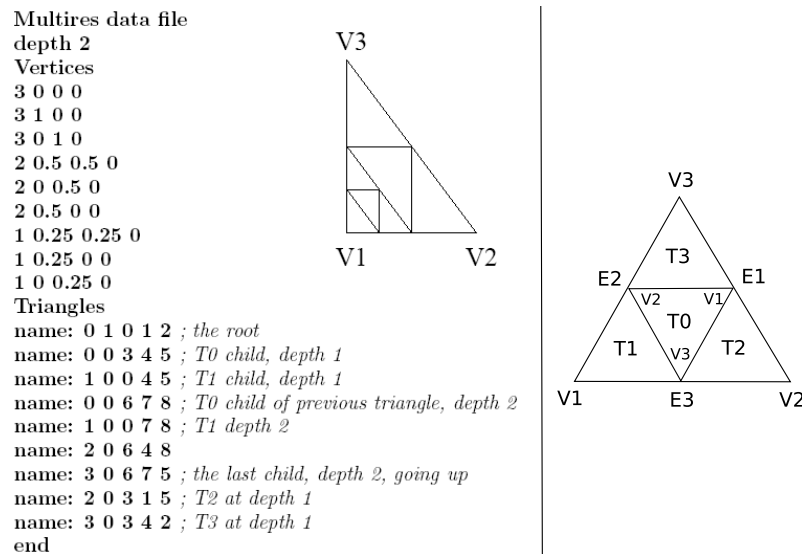


FIG. 5.3 – A gauche : maillage remaillé de façon adaptative et sa représentation hiérarchique correspondante. Le nombre de niveaux de résolution maximal est indiqué en début de fichier, suivi des sommets, en commençant par ceux attachés au niveau le plus grossier. Pour finir, une convention spéciale est utilisée pour les triangles, où deux indices indiquent s'il est une racine ou un fils et sa position. Ceux-ci respectent les conventions de nommage des sommets et triangles, précisé dans le schéma de droite. Images tirées de [51]

et des ondelettes de chaque niveau de résolution est décrite de manière identique aux formats standards, avec une indication supplémentaire de leur niveau de résolution.

Dans l'exemple simple de la figure 5.3, contenant un seul triangle grossier, la géométrie et la connectivité de ce dernier sont recensés en premier. Les trois premières lignes du fichier indiquent respectivement son type, le nombre  $n$  de niveaux de résolution et le fait que les sommets seront listés en premier. Puis au début de chaque ligne de coordonnées des sommets, est précisé le niveau de résolution auquel il a été ajouté, sachant que le niveau le plus grossier correspond à  $n + 1$ , jusqu'au niveau le plus fin égal à 1. Les coordonnées des sommets peuvent être substituées par les coordonnées des coefficients d'ondelettes, en dehors de celles du maillage de base. On a cette fois à faire à un fichier d'extension "BW", de même structure que les fichiers "DAT". Une hiérarchisation des triangles est également utilisée, juste après le mot clé "Triangles". Celle-ci est précisée sur l'exemple (partie gauche de la figure) et respecte toujours les conventions de nommage présentées sur la partie de droite. L'exemple présente un maillage adaptatif où tous les triangles ne sont pas subdivisés jusqu'au même niveau de résolution, mais il est également possible de représenter des maillages à subdivisions uniformes.

### 5.3.2.2 Format du fichier auxiliaire regroupant les informations additionnelles

Etant donné que le format des fichiers d'ondelettes (regroupant majoritairement l'ensemble des informations géométriques de chaque patch) est imposé par la méthode de codage zerotree utilisée, nous avons ajouté dans un "fichier auxiliaire", l'ensemble des informations additionnelles nécessaires au décodage. Ce fichier est compressé sans perte, par un codeur arithmétique. Il regroupe les informations suivantes : le nombre de partitions considérées ainsi que leur information de rugosité, les filtres d'analyse considérés

pour chacune et enfin des codes spécifiques explicités ci-après. L'utilisation du format BW pour stocker les informations géométriques et topologiques relatives à chaque patch implique alors une répétition de certains sommets grossiers et certaines ondelettes situées au niveau des frontières de patches dans plusieurs fichiers. En effet, ces frontières peuvent être partagées par plusieurs patches voisins. Plus précisément, un même sommet grossier peut être listé dans un, deux voire un plus grand nombre de fichiers, s'il correspond à un coin partagé par plusieurs partitions. D'autre part, les ondelettes étant rattachées aux arêtes, elles ne peuvent être répétées que dans deux fichiers différents (donc liées à un maximum de deux patches voisins), en considérant les maillages manifold.

Ceci produit alors une information redondante si l'on sait que le client souhaite reconstruire l'ensemble des patches de façon uniforme. Ainsi nous avons choisi de ne pas répéter les coordonnées du maillage grossier dans les différents fichiers impliqués. Cette considération permet également de simplifier et de rendre plus robuste et flexible la phase de reconstitution du polyèdre à partir de ses morceaux reçus sous forme de trames binaires indépendantes (au décodage). En effet, chacune de ces trames aura alors pu être reçue partiellement.

Nous avons ainsi élaboré une méthode qui ne code l'ensemble des coordonnées du maillage de base qu'une seule fois et utilise une référence vers ceux-ci dans les fichiers où elles sont répétées, de façon à supprimer cette redondance. Les codes correspondant à ces références, sont alors ajoutés au fichier auxiliaire.

Nous comparons dans le tableau 5.1 la taille totale (en Ko) pour l'ensemble des fichiers comprimés de plusieurs objets donnés, en considérant la redondance ou non au niveau des coordonnées du maillage grossier. Pour chaque modèle usuel considéré, deux segmentations différentes (résultant des deux méthodes d'agrégation exposées à la section 3.4.3) ont été considérées. Après la phase d'analyse multirésolution, seuls les 12 premiers plans de bits des informations géométriques de chaque région ont été codés. Les résultats présentés dans le tableau 5.1, montrent un très faible surcoût de la solution que nous avons envisagée, par rapport à la répétition des informations dans l'ensemble des partitions, sachant que notre méthode est plus robuste aux variations de quantifications dans les partitions, puisque les références sont codées sans perte. En effet, à part lorsque le patch contenant les coordonnées les plus grossières est perdu lors de la transmission du flux 3D, cette solution évite des algorithmes complexes pour une mise en correspondance des coordonnées, dans le cas où deux patches voisins ne seraient pas quantifiés de la même manière. Une méthode plus optimisée pourrait être envisagée afin de gagner d'avantage.

Au niveau des ondelettes, le tableau 5.2 compare tout d'abord la taille totale (en Ko) pour l'ensemble des fichiers comprimés des mêmes objets, en considérant la redondance ou non au niveau des coordonnées des coefficients d'ondelettes. Les coefficients sont alors soit mentionnés dans les deux fichiers correspondants aux deux patches séparés par une frontière commune, soit uniquement dans le fichier associé au patch non lisse (qui sera en général reconstruit de façon plus précise que la partie lisse). Les mêmes considérations que précédemment sont employées (deux segmentations présentées pour chaque modèle et les 12 premiers plans de bits codés), ainsi que l'élimination de la redondance au niveau des coordonnées du maillage grossier (utilisée dans l'ensemble de

TAB. 5.1 – Comparaison de la taille des fichiers de compression ondelettes (en Ko) pour les objets usuels (remaillés par *NM*), lorsque les coordonnées du maillage grossier sont répétées ou non dans les différentes partitions.

'#  $V_{sr}$ ' : nombre de sommets du modèle semi-régulier considéré. '# niv.' : nombre de niveaux de résolution. '# reg. 1' : nombre de régions produites par la première règle d'agrégation, et '# reg. 2' : par la seconde (cf. section 3.4.3).

	Venus	Skull	Feline	Rabbit
# $V_{sr}$ (# niv.)	163 842 (4)	131 074 (4)	258 046 (5)	70 658 (5)
# reg. 1 / # reg. 2	11 / 5	6 / 2	11 / 9	4 / 3
Taille avec redond.	108,66 / 93,67	38,69 / 36,53	62,08 / 60,22	21,28 / 17,82
Taille sans redond.	109,18 / 94,03	39,08 / 36,72	62,32 / 60,40	21,35 / 17,87
% surcoût redond.	-0,49% / -0,38%	-1,01% / -0,52%	-0,4% / -0,3%	-0,3% / -0,3%

ce chapitre).

Le surcoût dû à la redondance est d'environ 1,5% en moyenne, ce qui ne représente pas un très fort pourcentage. Ainsi dans les comparaisons futures, nous avons choisi de conserver la redondance au niveau des ondelettes, ce qui ne fera pas beaucoup varier les résultats par rapport à l'autre considération. Néanmoins, nous tirons profit du faible gain mentionné, dans le cadre d'applications visant une reconstruction uniforme des patches ou privilégiant les parties non lisses.

Un surcoût général en comparaison des méthodes globales, majoritairement dû à la répétition de la géométrie et de la connectivité liées aux ondelettes des frontières, est tout de même non négligeable. Ce surcoût pourrait être réduit en adoptant le même principe de partitionnement en segments disjoints que Sim *et al.* [110] ont mis au point conjointement avec une nouvelle méthode de codage basée sur *SPIHT*. Nous avons souhaité, dans un premier temps, utiliser la méthode de codage *zerotree* citée précédemment, pour laquelle de légères adaptations ont été nécessaires pour s'adapter à notre découpage surfacique. Même si nous sommes bien conscients de cette redondance, cette adaptation fournit malgré tout une technique robuste pour la compression et la décompression adaptative.

Nous avons enfin précisé dans ce même tableau 5.2, le rapport entre la taille du fichier auxiliaire et la taille du flux binaire total, qui s'élève en moyenne à 0,5%. Rappelons que les informations les plus denses de ce fichier auxiliaire sont les références vers les sommets du maillage grossier situés aux frontières de patches. Ces résultats montrent bien la faible densité des maillages grossiers considérés, en comparaison de la masse totale des informations à coder.

Explicitons maintenant les différentes façons possibles d'appliquer les schémas de prédiction sur les patches en se limitant ou non aux frontières. Le traitement choisi dépend principalement des applications ciblées ou de la qualité du canal de transmission dans lequel certains patches peuvent être perdus durant la transmission. De plus, comme nous l'avons vu au travers des méthodes détaillées à la section 5.2, il peut parfois être plus économique de ne reconstruire que très grossièrement les parties cachées, évitant

TAB. 5.2 – Comparaison de la taille des fichiers de compression ondelettes (en Ko) pour les objets usuels (remaillés par *NM*), lorsque les coordonnées des ondelettes sont répétées ou non dans les différentes partitions.

'#  $V_{sr}$ ' : nombre de sommets du modèle semi-régulier considéré. '# niv.' : nombre de niveaux de résolution. '# reg. 1' : nombre de régions produites par la première règle d'agrégation, et '# reg. 2' : par la seconde (cf. section ??).

	Venus	Skull	Feline	Rabbit
# $V_{sr}$ (# niv.)	163 842 (4)	131 074 (4)	258 046 (5)	70 658 (5)
# reg. 1 / # reg. 2	11 / 5	6 / 2	11 / 9	4 / 3
Taille avec redond.	109,18 / 94,03	39,08 / 36,72	62,32 / 60,40	21,35 / 17,87
Taille sans redond.	108,16 / 97,71	37,61 / 35,46	60,99 / 59,42	20,71 / 20,54
% surcoût redond.	+0,9% / -3,9%	+3,9% / +3,6%	+2,2% / +1,6%	+3,1% / -13%
Taille fichier aux.	0,55 / 0,38	0,42 / 0,21	0,29 / 0,23	0,10 / 0,07
% fichier aux.	0,5% / 0,4%	1,1% / 0,6%	0,5% / 0,4%	0,5% / 0,3%

ainsi une transmission et un décodage des ondelettes associées à ces patchs. Dans ces cas précis, il peut être intéressant de limiter les masques au niveau des frontières de patchs, surtout si l'on envisage par exemple une reconstruction parfaite d'un patch  $p$  sachant que tous les patchs voisins resteront grossiers. Les bords de  $p$  ne seront alors pas reconstruits parfaitement si lors de l'analyse, les masques appliqués près des frontières de patchs ont "débordé" de celles-ci pour le calcul de la prédiction. C'est pour cela que nous proposons une considération plus locale (détaillée par la suite), afin d'éviter ce genre de problèmes.

Nous présentons dans la suite, les résultats (en termes de taux de compression) associés à ces différentes considérations, ainsi qu'une comparaison, de façon à trouver le meilleur schéma adapté aux applications visées. Nous considérons dans un premier temps le schéma Butterfly non lifté pour l'ensemble des expérimentations, puisqu'il permet d'obtenir les meilleurs taux de compression pour une analyse globale sur *NM*. Dans un second temps, nous présentons à la section 5.4 une étude sur des nouveaux schémas de prédiction, réalisée dans le but d'améliorer ce dernier surtout dans les zones non lisses.

### 5.3.3 Décomposition locale en ondelettes et gestion des bords

#### 5.3.3.1 Considération "globale" lors de l'analyse

Pour cette première considération (désignée GBG par la suite), la décomposition en ondelettes a lieu de la même façon que dans le cas d'une analyse globale, excepté qu'il est possible de choisir différents filtres de prédiction ou d'ondelettes à appliquer à chaque patch ou chaque cluster. Chaque schéma utilisé est indiqué dans le fichier auxiliaire évoqué précédemment, qui répertorie toutes les informations additionnelles utiles à la synthèse locale.

On suppose alors que la reconstruction sera uniforme, pour éviter les erreurs trop importantes près des frontières de régions, qui seront d'autant plus visibles que la dif-

férence de niveaux de résolution considérés sera importante entre patchs voisins. Pour éviter de faire cette supposition, nous avons proposé deux autres méthodes pour lesquels l'application des filtres d'analyse se limite aux frontières de patchs, soit en "coupant" le schéma à la frontière, soit en le complétant par des sommets virtuels calculés par symétrie par rapport aux sommets "à disposition" (constituant le patch considéré). Nous présentons par la suite, une comparaison de ces deux alternatives en termes de codage et de flexibilité de la reconstruction.

### 5.3.3.2 Considérations "locales" lors de l'analyse

La première des deux approches envisagées (désignée GBL<sub>1</sub> par la suite), considère pour les prédictions des nouveaux sommets situés en frontière de patch, les masques de bords illustrés à la figure 1.16 (utilisés habituellement sur les bords des maillages ouverts). Passons maintenant aux autres sommets à prédire, situés cette fois-ci à proximité des frontières de patchs mais pas directement sur la frontière. Pour leur prédiction, le schéma Butterfly "classique" (présenté dans la partie supérieure gauche de la figure 5.4) ne peut alors pas être utilisé tel quel. Ceci oblige alors à considérer un des deux sommets situés de part et d'autre de l'arête contenant le sommet  $s$  à prédire (représentés par  $f$  et  $g$  sur ce même schéma) ou les deux comme étant irrégulier. La prédiction est donc moins précise, impliquant de plus importants coefficients d'ondelettes, comme le montrent le tableau 5.3 et la figure 5.5.

C'est pourquoi nous proposons une autre considération (GBL<sub>2</sub>) qui imagine des sommets "virtuels fantômes" situés en dehors du patch courant, mais dont la position est déduite par symétrie des autres sommets présents dans ce patch. Pour cela, plusieurs cas particuliers peuvent se produire, suivant la valence des sommets  $f$  et  $g$ . Nous listons ces cas à la figure 5.4 où, même lorsqu'un seul sommet des "ailes" du schéma Butterfly fait partie du patch courant, nous l'utilisons pour prédire les trois autres en tenant compte des normales aux deux triangles impliqués dans la symétrie.

### 5.3.3.3 Comparaison des deux approches

Nous avons comparé la distorsion produite lors de la reconstruction des objets usuels (remaillés par  $NM$ ), suivant les trois considérations différentes envisagées aux frontières des partitions (GBG, GBL<sub>1</sub> et GBL<sub>2</sub>) et exposées précédemment. Les résultats sont d'abord présentés sur deux objets dans le tableau 5.3, avec toujours deux segmentations associées à chaque modèle et en considérant le codage des 12 premiers plans de bits).

Les segmentations choisies laissent apparaître des nombres variés de régions, pour envisager différents comportements dans ces cas de figure. Nous avons de plus mis en relation ces résultats avec le pourcentage des arêtes situées en frontière de patchs, par rapport au nombre d'arêtes total. Le pourcentage des prédictions proches d'une frontière de patch (pour lesquelles le masque de Butterfly est "coupé" par un bord) est également indiqué et ces deux mesures vont dans un même sens. On remarque également que plus le nombre d'arêtes présentes en bords de patchs est important et plus il y a de surcoût.

Pour compléter le tableau, les histogrammes de la figure 5.5 comparent les distributions de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes, obtenus par analyse locale et par ces différentes considérations en bordure de patchs, sur l'objet "Venus" remaillé par  $NM$ . Les résultats viennent compléter ceux présentés dans le tableau 5.3,

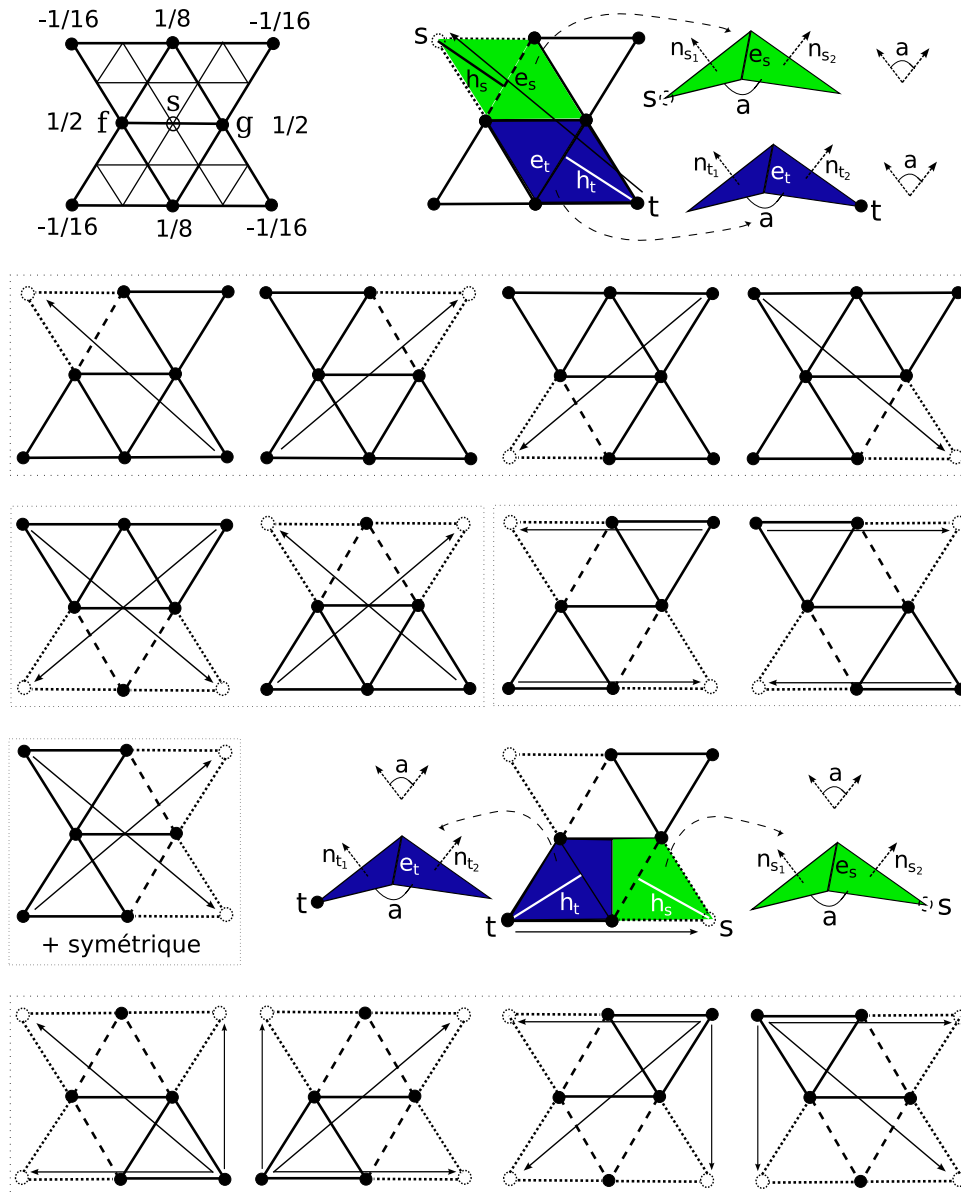


FIG. 5.4 – Ligne 1 : Rappel du voisinage et des poids considérés dans le schéma de prédiction Butterfly (à gauche). A droite : méthode utilisée pour compléter les "sommets manquants" par symétrie diagonale (de sorte que les angles  $a$  et les hauteurs  $h_s$  et  $h_t$  des complexes grisés soient égaux), lorsqu'un bord de patch (en gros pointillés) est pris en compte. Ligne 2 : différentes configurations possibles lorsqu'un unique bord de patch intervient dans le schéma (symétrie diagonale considérée). Ligne 3 et 4 : différentes configurations possibles lorsque deux bords de patch interviennent (symétrie diagonale ou horizontale considérée) et schématisation des complexes considérés pour la symétrie horizontale. Dernière ligne : différentes configurations possibles avec trois frontières de patch.



TAB. 5.3 – Comparaison de la taille des fichiers de compression ondelettes (en Ko) et de la distorsion produite lors de la reconstruction des objets usuels (remailés par NM), suivant les trois considérations différentes envisagées aux frontières des partitions.

'#  $V_{sr}$ ' : nombre de sommets du modèle semi-régulier considéré. '# niv.' : nombre de niveaux de résolution. '# reg. 1' : nombre de régions produites par la première règle d'agrégation, et '# reg. 2' : par la seconde (cf. section ??).

'% front.' : pourcentage des arêtes situées en frontière de patches. '% PF' : pourcentage des prédictions proches d'une frontière de patch (pour lesquelles le masque de Butterfly est "coupé" par un bord).

' $d_H$ ' : distance de Hausdorff relativement à la diagonale de la boîte englobante de l'objet (les chiffres doivent être multipliés par  $10^{-4}$ ).

	Skull	Feline
# $V_{sr}$ (# niv.)	131 074 (4)	258 046 (5)
# reg. 1 / # reg. 2	6 / 2	11 / 9
% front.	7% / 12%	13% / 9%
% PF	6,67% / 5,39%	11,04% / 7,47%
$d_H$ GBG	3,94 / 4,01	1,42 / 1,37
Taille GBG	39,08 / 36,72	62,32 / 60,40
$d_H$ GBL1	3,95 / 4,01	1,41 / 1,38
Taille GBL1	59,59 / 50,73	76,91 / 73,36
% surcoût	+52,5% / +38,2%	+23,4% / +21,5%
$d_H$ GBL2	3,96 / 4,01	1,41 / 1,38
Taille GBL2	52,07 / 46,27	74,82 / 70,37
% surcoût	+33,2% / +26%	+20,1% / +16,5%

puisque les distributions de l'amplitude et de l'angle polaire sont plus importantes (en nombre de représentants) à partir de 0,1 en moyenne (indiquées par des carrés rouges sur les histogrammes).

Passons maintenant à une étude plus détaillée sur l'objet "Venus", afin de comparer la reconstruction produite par les trois méthodes lorsque la région lisse de la surface est laissée grossière. Au niveau de la frontière de la région lisse, la première méthode produit des erreurs même sur les patches non lisses, contrairement aux deux autres.

Nous avons analysé la distorsion de chaque patch non lisse, pour montrer le résultat de sa reconstruction indépendante, sous forme de courbes débit/distorsion. On remarque sur les graphiques de la figure 5.6, que les courbes correspondant aux trois considérations sont très proches à bas débit, mais que la distorsion devient beaucoup plus importante pour GBG à plus haut débit (lorsque la taille de la trame binaire totale devient plus élevée). Ceci montre bien l'intérêt de nos masques de prédiction limités aux bords des patches, pour de telles reconstruction, envisageables, notamment dans des applications telles que la visualisation sélective d'un ensemble de patches.

#### 5.3.4 Codage zerotree et entropique indépendants

En plus des coefficients d'ondelettes, les "fichiers ondelettes" BW renferment également les coefficients d'échelle correspondant à la géométrie et la connectivité du

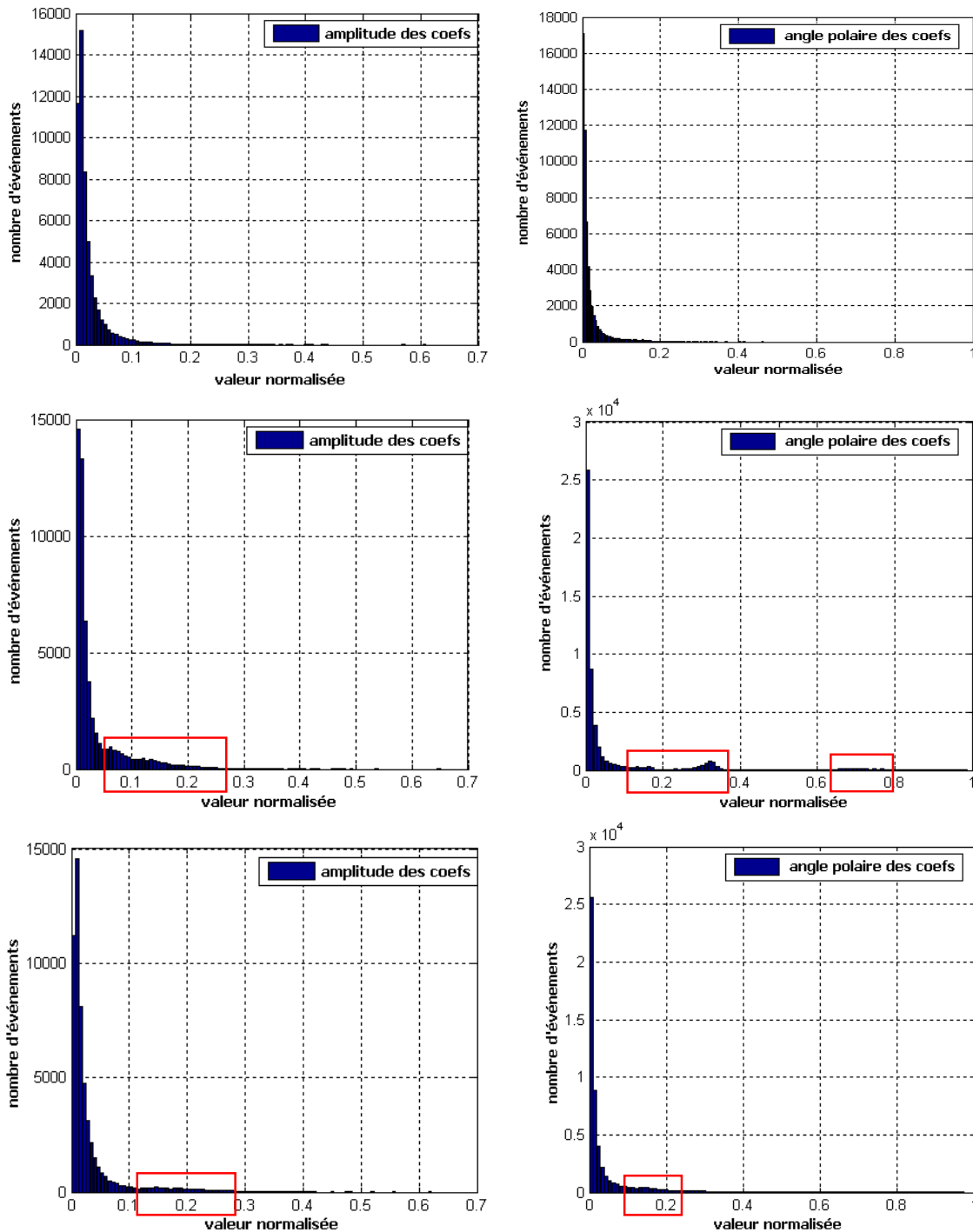


FIG. 5.5 – Ligne 1 : Distribution normalisée de l'amplitude et de l'angle polaire, pour l'ensemble des coefficients d'ondelettes de la hiérarchie. Ceux-ci ont été produits par analyse locale, sans prise en compte des frontières de patches (GBC), sur l'objet "Venus" remaillé par NM. Ligne 2 et 3 : Mêmes distributions pour les considérations locales GBL1 et GBL2. Les carrés rouges indiquent les endroits de la distribution pour lesquels les considérations locales possèdent un plus grand nombre de représentants.

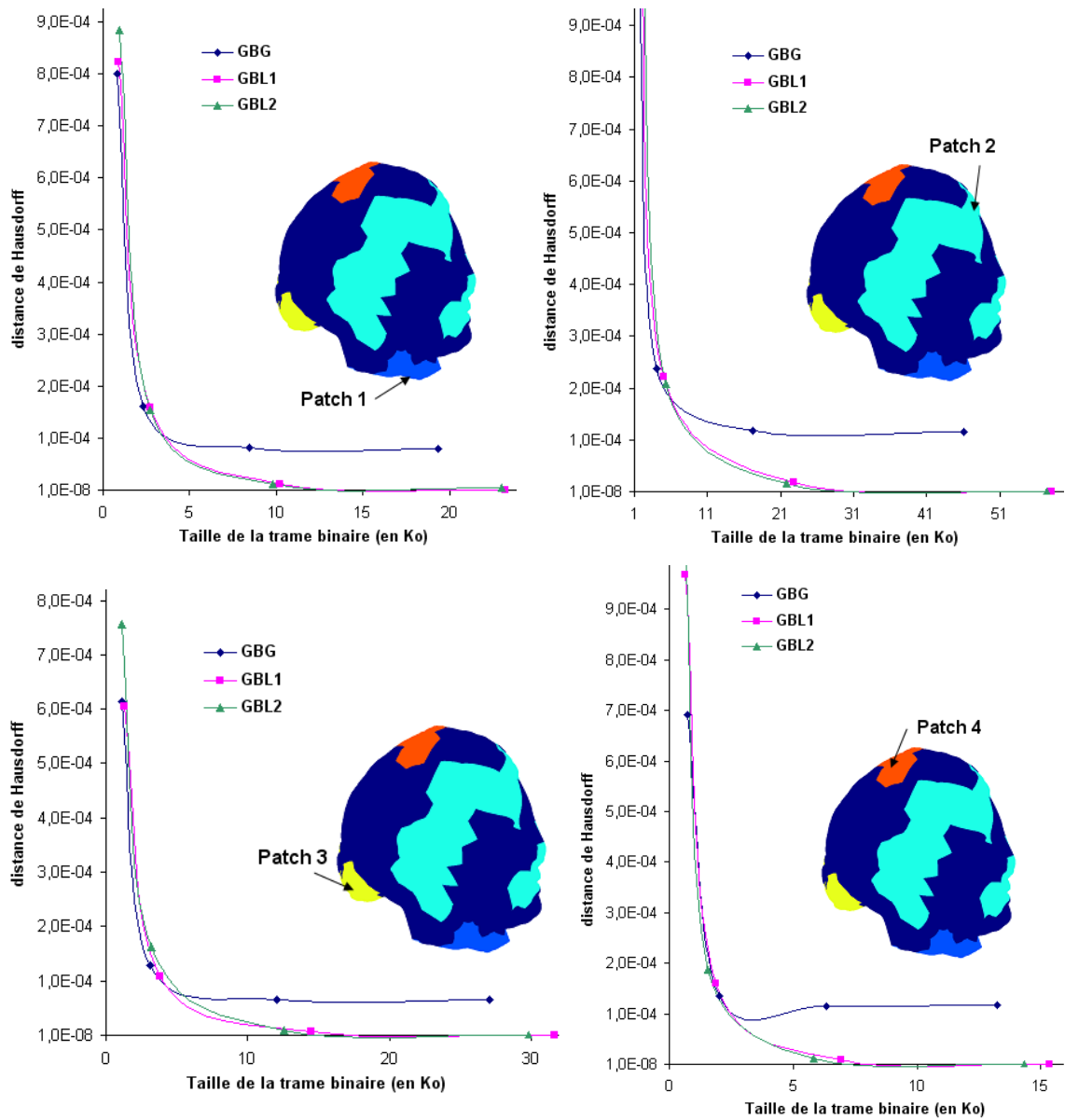


FIG. 5.6 – Comparaison des courbes débit/distorsion sur les quatre patches non lisses (sur 5), produits par segmentation de l'objet "Venus" remaillé par NM. Ce modèle a été analysé localement en utilisant les trois types de considérations différentes en bordure de patches. De façon à montrer concrètement les différences de traitements, la partition lisse (en bleu foncé) a été laissée grossière.

maillage grossier. La partie géométrie du maillage de base est encodée par l'algorithme de Khodakovsky *et al.* [58], qui prévoit de l'intégrer au zerotree. Plus précisément, les quatre premiers plans de bits de ces coordonnées sont stockés directement après l'en-tête de l'archive zerotree, tandis que les plans de bits de raffinement suivants sont positionnés à la manière de ceux des coefficients d'ondelettes. Ceci permet alors d'obtenir un maillage grossier raisonnable même à très faible débit, dans le cas où les ondelettes sont quasi-inexistants. En ce qui concerne la connectivité, nous avons utilisé, comme Khodakovsky *et al.*, le codeur monorésolution TMC de Touma et Gotsman [121], la majorité des auteurs se servant d'algorithmes de compression de maillages statiques monorésolution ([121, 118, 98]), pour cette tâche.

Le codage en zerotree de chaque fichier ondelettes est réalisé grâce à un exécutable ("code.exe"), qui possède plusieurs options différentes. Le "pack" d'exécutables dont il est extrait a été produit dans le cadre de l'article PGC [58]. Il est disponible sur le site de Caltech [50] ainsi que les instructions nécessaires à son utilisation. Nous utilisons systématiquement les options de cet exécutable permettant premièrement que le codage et le décodage du maillage soient réalisés de manière uniforme et deuxièmement pour intégrer le codage de la géométrie grossière dans le zerotree comme expliqué précédemment.

Il est ensuite possible de préciser un nombre de plans de bits à encoder (pour la quantification) ou également une taille de fichier zerotree souhaitée. Le codeur arithmétique intégré à cet exécutable est également utilisé sur ces données. Pour le traitement local par patch, une automatisation des différents codages (zerotree pour la géométrie, monorésolution pour la connectivité et arithmétique pour le fichier auxiliaire) a été nécessaire, pour n'avoir qu'une action à exécuter au lieu de les multiplier par le nombre de partitions.

A signaler que nous avons détecté un comportement anormal survenant suite au décodage zerotree de Khodakovsky *et al.* [58]. Celui-ci se produit pour des configurations de patches particulières où une région connexe englobe totalement une autre région et lorsque cet anneau se rejoint exactement en un sommet de base. Le sommet en question était alors répété deux fois dans le fichier produit, suite au décodage zerotree, ce qui n'est pas le cas pour d'autres configurations. Ces sommets spéciaux sont maintenant détectés préalablement et signalés dans le fichier auxiliaire pour permettre au décodeur adaptatif d'effectuer normalement la reconstruction côté client.

### 5.3.5 Quantification et allocation binaire différenciées pour chaque patch

Notre "framework" permet une quantification et une allocation binaire différenciées pour chaque patch, étant donné que chacun d'entre eux est codé de manière séparée (par des algorithmes similaires).

Les résultats présentés dans ce chapitre considèrent une quantification uniforme pour chacune des régions, en termes de plans de bits, c'est-à-dire qu'on obtient la progressivité en faisant varier le nombre de plans de bits décodés, qui est le même pour toutes les régions, pour un débit donné. Avant de se lancer dans la résolution d'équations de minimisation à la manière de Sim *et al.* [109, 110] ou Payan *et al.* [90, 91], qui tiennent compte à la fois d'une quantification différenciée au niveau des sous-bandes de coefficients et des patches, nous proposons d'étudier les tendances générales pour diffé-

rentes allocations considérées. Les différences de distorsion sont ainsi analysées lorsque différents débits sont alloués en fonction de l'aspect lisse ou rugueux des patches de l'ensemble des objets usuels.

#### 5.3.5.1 Optimisation de la quantification et de l'allocation binaire des patches

Les tableaux 5.4 et 5.5 comparent la distorsion produite lors de la reconstruction des objets "Venus" et "Horse" (remaillés par NM), pour les mêmes taux de compression (94 et 34 Ko : correspondant à la taille pour un codage uniforme des 12 premiers plans de bits). Plusieurs autres allocations différentes des partitions sont envisagées pour les deux objets de façon à montrer les différentes tendances en termes de distorsion. Nous avons précisé à chaque fois pour chaque patch, son taux de compression et sa distorsion par rapport au patch d'origine, pour chacune des considérations.

Pour ces dernières allocations, les bits alloués en fonction de la taille des patches, tiennent compte de la taille du fichier ondelettes. La deuxième considération alloue les bits par rapport à la contribution du nombre de sommets du patch relativement au nombre total. Puis par rapport à cette dernière allocation, il est enfin possible d'allouer deux ou trois fois plus de bits aux patches lisses ou au contraire aux patches non lisses.

On remarque que les tendances pour les deux objets sont relativement différentes, mais on note tout de même que, de façon générale, le fait d'allouer plus de bits aux patches lisses, en dépit des autres augmente fortement la distorsion globale. Ainsi pour chaque objet et chaque type d'application visée, il serait indispensable d'envisager une optimisation sous forme d'une formule de lagrange, du type de celle considérée par Sim *et al.* [109, 110] ou celle utilisée par Payan *et al.* [90, 91]. A ce sujet, nous rappelons maintenant leurs principales différences, qu'il serait intéressant de coupler pour obtenir encore de meilleurs résultats en termes de taux de compression.

Sim *et al.* basent d'une part leur optimisation sur l'arrêt du transfert de la trame binaire allouée à chaque segment surfacique, à partir du moment où les plans de bits ajoutés n'apportent plus assez de détails par rapport à la qualité désirée. Ainsi les inconnues de l'équation de minimisation sont la taille de la trame binaire à allouer pour chaque segment. L'équation doit, de plus, intégrer une estimation de la mesure de distorsion entre l'objet original et le maillage reconstruit grâce à ces trames. Il serait alors possible d'appliquer la synthèse en ondelettes sur les coefficients issus des trames pour calculer la distorsion exacte sommet à sommet, mais ce processus serait trop coûteux à réaliser durant l'étape d'optimisation.

Ainsi, de manière similaire à Payan *et al.*, les auteurs proposent d'estimer la distorsion à partir des mesures à disposition, c'est-à-dire les coefficients d'ondelettes. La distorsion géométrique est alors bien estimée en calculant l'erreur quadratique moyenne (EQM) des coefficients quantifiés. Pour la calculer, il faut traduire mathématiquement l'influence des filtres de synthèse sur la reconstruction du signal, sachant que les filtres utilisés (Butterfly non lifté) ne sont pas orthogonaux entre eux, mais bi-orthogonaux par construction avec le schéma lifting. La distorsion géométrique n'est alors pas linéairement proportionnelle à l'EQM des coefficients d'ondelettes. Pour combler cela, les erreurs relatives aux coefficients sont pondérées en fonction de leur niveau de résolution, pour les filtres considérés. En effet, l'erreur dans le positionnement d'un sommet grossier va alors être propagée sur tous les niveaux suivants, puisque ce sommet sera

utilisé dans la prédiction des sommets plus fins. Ainsi les coefficients d'ondelettes d'un niveau grossier (correspondant à des basses fréquences) sont associés à un poids plus important dans le modèle de distorsion.

Basée sur la même technique de compression sans perte du maillage grossier que celle utilisée dans CNM [56], les taux de compression obtenus sont légèrement meilleurs sur la plupart des modèles, sachant que l'algorithme considéré nécessite des informations additionnelles pour l'attribution des débits différents à chaque segment. Le seul maillage pour lequel les performances sont similaires est le modèle "Rabbit" qui, étant globalement lisse, engendre un même nombre de bits alloués à chaque segment, l'ensemble ayant alors des caractéristiques communes (mêmes types de fréquences).

Dans l'approche de Payan *et al.* les inconnues de l'équation de minimisation sont cette fois-ci les pas de quantification des sous-bandes basse et haute fréquence (composée des composantes tangentielle et normale pour chaque niveau de résolution). Ils proposent ainsi d'évaluer la distance géométrique dans l'espace transformé, en exprimant l'EQM propre à la géométrie du maillage semi-régulier en fonction de l'erreur de quantification dans les différentes sous-bandes. L'équation de minimisation est alors résolue grâce à des modèles de distribution statistique différents pour les composantes normales et tangentielles, vu que les coefficients sont principalement dirigés suivant la normale. La sous-bande basse-fréquence étant également prise en compte, les pondérations appliqués aux coefficients d'ondelettes doivent alors en plus tenir compte des gains introduits par le schéma lifting (étape "N" sur la figure 1.17) pour satisfaire la condition de normalisation. Néanmoins, les auteurs montrent le gain considérable (pour les taux de compression) obtenu en considérant cette EQM pondérée, par rapport à une EQM faisant l'hypothèse de filtres orthogonaux.

Une fois compressées par zerotree, les données sont alors prêtes à être transmises sur le réseau, pour envisager une reconstruction des maillages du côté client. Nous disposons alors de trois types de fichiers : les fichiers d'encodage sous forme de zerotree de la géométrie de chaque patch (géométrie du complexe de base et ondelettes), les fichiers d'encodage de la connectivité des complexes de base et enfin le fichier auxiliaire servant à corriger les éventuelles erreurs produites par le décodeur zerotree. Ce dernier sera également utilisé lors du recollage des parties grossières des patches ainsi qu'à la synthèse.

Les étapes d'analyse précédemment décrites sont alors inversées du côté client. La première étape consiste à décoder chaque élément du flux binaire séparément, puis à recoller les parties les plus grossières et enfin appliquer la décomposition ondelettes inverse. Les étapes du schéma lifting sont également inversées, en commençant par l'étape de mise à jour (si celle-ci a été considérée), puis de prédiction et enfin de sur-échantillonnage. Pour un rappel détaillé de l'ensemble des traitements d'analyse et de synthèse, le lecteur est invité à se référer à la figure 5.7.

### 5.3.6 Décodage séparé de chaque fichier d'ondelettes

Pour reconstituer les "fichiers ondelettes" sous forme ASCII (respectant le principe du format spécifié par la figure 5.3), il faut d'abord pour chaque patch procéder au décodage topologique de la connectivité du complexe de base. Ainsi il est possible de



TAB. 5.4 – Comparaison de la distorsion produite lors de la reconstruction de l'objet "Venus" (remaillés par NM), pour une même taille de compression (94 Ko) en considérant plusieurs allocations binaires au niveau des patches.

'#  $V_{sr}$ ' : nombre de sommets du modèle semi-régulier considéré. '% # V' : rapport du nombre de sommets d'un patch avec le nombre de sommets total. '# niv.' : nombre de niveaux de résolution.

'# reg. 1' : nombre de régions produites par la première règle d'agrégation, et '# reg. 2' : par la seconde (cf. section ??).

' $d_H$ ' : distance de Hausdorff relativement à la diagonale de la boîte englobante de l'objet (les chiffres doivent être multipliés par  $10^{-4}$ ).

'12pb (tous)' : allocation binaire uniforme pour les patches, avec un codage des 12 premiers plans de bits pour chacun.

	Total	patch 0	patch 1	patch 2	patch 3	patch 4
type	-	lisse	rugueux	rugueux	rugueux	rugueux
# $V_{sr}$	163 842	103 710	10 513	29 865	16 009	6 881
% # V	-	63,3%	6,4%	18,2%	9,8%	4,2%
Taille 12pb (tous)	<b>94,03</b>	49,52	8,46	17,27	12,04	6,34
$d_H$ 12pb (tous)	0,879	0,0966	0,0940	0,156	0,0622	0,0565
Taille taille patches	<b>94,03</b>	49,47	8,46	17,26	12,03	6,34
$d_H$ taille patches	0,865	0,0969	0,0830	0,156	0,0604	0,0541
Taille *2 lisse	<b>94,03</b>	64,38	5,60	11,42	7,95	4,20
$d_H$ *2 lisse	0,896	0,106	0,268	0,396	0,197	0,177
Taille *2 rugueux	<b>94,03</b>	33,97	11,43	23,33	16,28	8,55
$d_H$ *2 rugueux	0,882	0,202	0,0898	0,161	0,0670	0,0677

TAB. 5.5 – Comparaison de la distorsion produite lors de la reconstruction de l'objet "Horse" (remaillés par NM), pour une même taille de compression (34 Ko) en considérant plusieurs allocations binaires au niveau des patches.

'#  $V_{sr}$ ' : nombre de sommets du modèle semi-régulier considéré. '% #  $V$ ' : rapport du nombre de sommets d'un patch avec le nombre de sommets total. '# niv.' : nombre de niveaux de résolution.

'# reg. 1' : nombre de régions produites par la première règle d'agrégation, et '# reg. 2' : par la seconde (cf. section ??).

' $d_H$ ' : distance de Hausdorff relativement à la diagonale de la boîte englobante de l'objet (les chiffres doivent être multipliés par  $10^{-4}$ ).

'12pb (tous)' : allocation binaire uniforme pour les patches, avec un codage des 12 premiers plans de bits pour chacun.

	Total	patch 0	patch 1	patch 2	patch 3	patch 4
type	-	rugueux	rugueux	rugueux	lisse	rugueux
# $V_{sr}$	112 642	8 257	21 137	3 633	72 622	7 857
% # $V$	-	7,3%	18,8%	3,2%	64,5%	7,0%
Taille 12pb (tous)	<b>33,93</b>	3,33	8,27	1,80	17,16	3,25
$d_H$ 12pb (tous)	0,213	0,0542	0,0569	0,0628	0,0430	0,0590
Taille taille patches	<b>33,92</b>	2,51	6,31	1,16	21,42	2,41
$d_H$ taille patches	0,220	0,0933	0,0957	0,133	0,0330	0,106
Taille *3 lisse	<b>33,92</b>	1,16	2,85	0,56	28,11	1,12
$d_H$ *3 lisse	0,315	0,259	0,268	0,433	0,0344	0,403
Taille *3 rugueux	<b>33,92</b>	4,30	10,89	1,94	12,55	4,11
$d_H$ *3 rugueux	0,212	0,0338	0,0329	0,0575	0,0636	0,0380

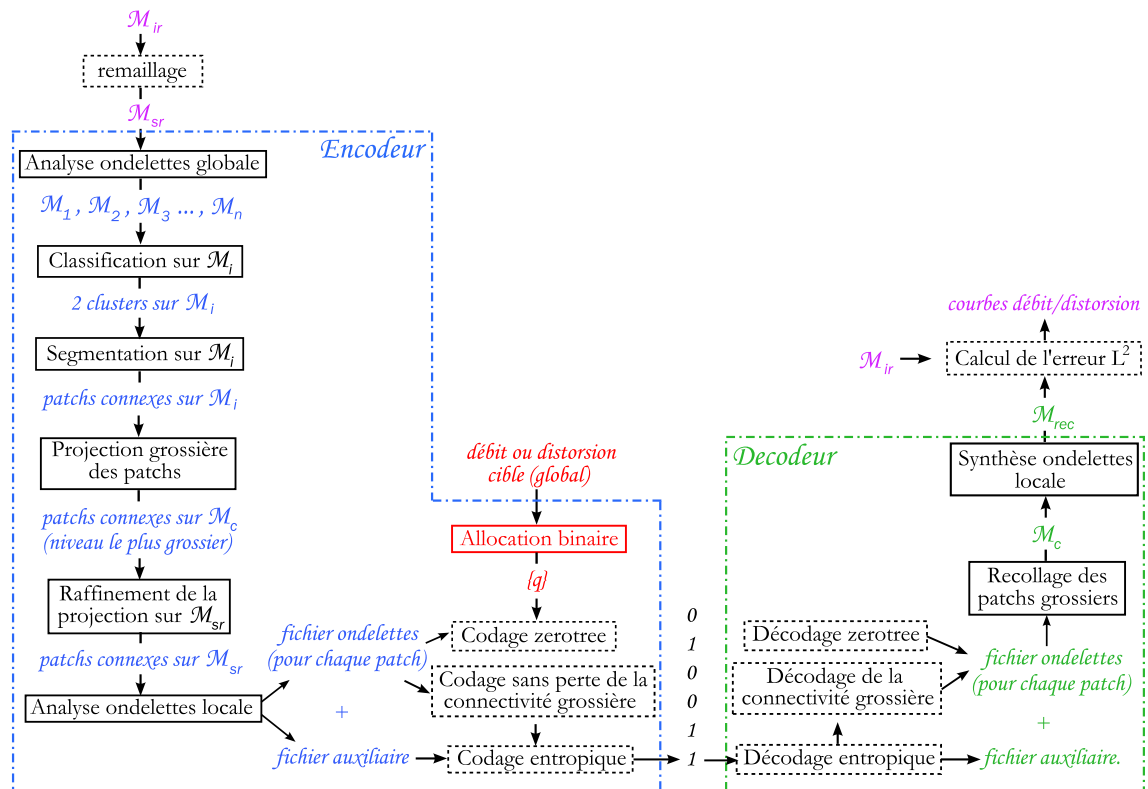


FIG. 5.7 – Grandes étapes de notre "framework" d'analyse et de synthèse locales. Celui-ci prend en entrée un maillage semi-régulier  $M_{sr}$  obtenu par remaillage sur le modèle irrégulier d'origine  $M_{ir}$ . Puis une analyse globale en ondelettes décompose le modèle semi-régulier en  $n$  niveaux de résolution  $M_1, M_2, \dots, M_n$ . Il est alors possible de choisir n'importe lequel de ces maillages plus grossiers  $M_i$  pour procéder à sa classification suivie de sa segmentation en régions connexes. Pour compresser indépendamment chaque partition, nous employons une méthode de projection sur le complexe de base permettant de réaliser par la suite une décomposition puis un codage zerotree indépendants. Du point de vue de la synthèse, les complexes de base des partitions sont d'abord recollés puis les coefficients d'ondelettes sont associés à chaque arête du complexe global reformé. La synthèse en ondelettes permet alors une reconstruction  $M_{rec}$  qui peut enfin être comparée à l'objet d'origine.

lancer l'exécutable "code.exe" de Khodakovsky *et al.* [58] réalisant le décodage zerotree de la partie géométrique et le regroupement avec la partie topologique pour produire le fichier "BW" pour chaque région. Le lancement de cet exécutable au décodage considère les mêmes options que celles précisées précédemment pour le codage. Le fichier auxiliaire sera alors consulté pour remettre à jour les fichiers produits, si les cas particuliers évoqués antérieurement se sont produits.

### 5.3.7 "Recollage des patches" et synthèse locale

Le "recollage" est simplifié grâce à la convention de codage non redondant (basé sur les références) et adoptée pour le codage de la géométrie des sommets grossiers situés au niveau des frontières de régions, et impliqués dans au moins deux régions voisines. Les informations du fichier auxiliaire servent alors à mettre en correspondance l'information géométrique grossière des patches et ceci même si une quantification ou allocation différente a été considérée lors du codage de ces différents fichiers. Cette étape permet alors la reconstitution du maillage de base (sous réserve que les informations des complexes de base n'aient pas été perdues).

Le reste des informations portées par les fichiers ondelettes ASCII, c'est-à-dire les coordonnées des coefficients d'ondelettes ainsi que leur localisation spatiale, est alors utilisé pour les associer aux arêtes grossières correspondantes, sous forme d'arbre hiérarchique, pour les relier au niveau de résolution approprié. Au moment de la synthèse, les mêmes schémas de prédiction qu'à l'analyse sont utilisés et il est alors possible de choisir le niveau de résolution maximal souhaité pour chaque région. D'autre part, certains patches ou clusters donnés peuvent bénéficier d'un traitement spécial comme par exemple la non utilisation de l'étape de prédiction ou d'ajout d'ondelettes, dans le cas d'une visualisation sélective. L'objet reconstruit pourra alors être comparé en termes de distorsion à l'objet d'origine irrégulier pour ainsi disposer des courbes débit/distorsion.

Après avoir détaillé les grandes étapes de notre "framework" de compression adaptative, nous présentons dans la section suivante les résultats obtenus, en insistant tout d'abord sur la quantité d'informations additionnelles nécessaires à cette approche de compression locale, en comparaison de l'approche globale. Pour la méthode locale, les considérations évoquées précédemment qui ont donné les meilleurs résultats ont été retenues.

Sachant que le but principal de notre "framework" est la compression adaptative, permettant d'utiliser les meilleurs filtres de prédiction pour chaque type de rugosité, nous avons étudié dans la section suivante, les résultats produits par des recherches d'améliorations des filtres de prédiction existants.

## 5.4 Nouveaux schémas de prédiction envisagés

Notre "framework", tel que décrit précédemment favorise l'utilisation de différents schémas de prédiction ou filtres d'ondelettes pour chaque patch. Dans cette optique, on pourrait par exemple penser à utiliser un schéma de Butterfly lifté dans les zones où les coefficients associés à un maillage normal sont non normaux. Pour cela, il faudrait considérer une segmentation différente de celles utilisées jusqu'à présent, ainsi nous gardons

cette remarque pour de futurs travaux.

Ainsi nous avons plutôt travaillé sur une autre orientation, dans le but d'obtenir une meilleure prédiction des surfaces non lisses, grâce à une modification des filtres de prédiction existants. Nous les détaillons dans cette section, en présentant dans un premier temps les méthodes sur lesquelles nous nous sommes basés pour la création de ces filtres, prévus à l'origine pour s'appliquer sur des maillages irréguliers.

Nous proposons ensuite une adaptation de ceux-ci aux maillages semi-réguliers, afin de fournir une analyse multirésolution dont les transformées en ondelettes appartiennent toujours à la classe des ondelettes de seconde génération. Contrairement aux schémas de subdivision habituels, proposés pour les maillages semi-réguliers, ces filtres tiennent compte de la géométrie (*i.e.* la paramétrisation locale) du maillage paramétrique. La transformée en ondelettes devient alors dépendante de l'information paramétrique. Une évaluation de ces schémas est ensuite proposée, d'abord de façon globale sur la surface totale du maillage, puis localement, afin de déterminer leur pouvoir de prédiction en comparaison du schéma classique Butterfly.

#### 5.4.1 Principe des schémas originaux s'appliquant sur des structures irrégulières

Pour les méthodes dont nous nous sommes inspirés (décrites sommairement à la section 2.2.1), la structure irrégulière des maillages est directement considérée lors de l'analyse et la synthèse multirésolution. La notion de maillage progressif *PM* [45] est alors utilisée pour la simplification ou le raffinement progressifs des maillages traités. Un très grand nombre de niveaux de détails est alors produit. Dans ce cas précis, la décimation continue du maillage est par exemple réalisée grâce à une série de contractions d'arêtes. Nous avons tout d'abord considéré une des méthodes pionnières de généralisation d'outils de traitement du signal [43] sur des maillages triangulaires à connectivité irrégulière. Nous exposons par la suite une technique plus récente [41], où les schémas sont améliorés pour mieux tenir compte de l'anisotropie locale des surfaces.

Dans ce cadre irrégulier, les filtres utilisés doivent être non-uniformes, dans le but de former une analyse multirésolution sur les 2-variétés à connectivité irrégulière. Si des schémas de subdivision semi-uniformes pouvaient être considérés pour le lissage de ces structures [117, 119], il n'en est plus de même lorsque l'on veut définir une telle approche pyramidale.

Dans la suite, nous considérons les notations de l'article de Guskov *et al.* [43] pour décrire ces prédicteurs. Etant donné une arête  $e = (j, k)$  (ne faisant pas partie d'un bord), le schéma utilisé considère les quatre sommets  $j, k, l_1, l_2 \in \sqrt{\phantom{x}}$  (constituant les deux triangles adjacents à  $e$  et représentés sur la figure 5.8). Précisons que c'est plus particulièrement la différence des normales aux deux facettes qui est considérée pour la relaxation et que  $\sqrt{\phantom{x}}$  représente l'ensemble des sommets du maillage.

Rappelons que la prédiction produite par les masques réguliers comme Butterfly ne varie que par le changement de connectivité du maillage paramétrique. Le principe est de remplacer un sommet  $i$  par la moyenne de ces voisins, pour un voisinage spécifique (1-voisinage ou plus). Ces approches supposent alors que le voisinage du sommet  $i$  est

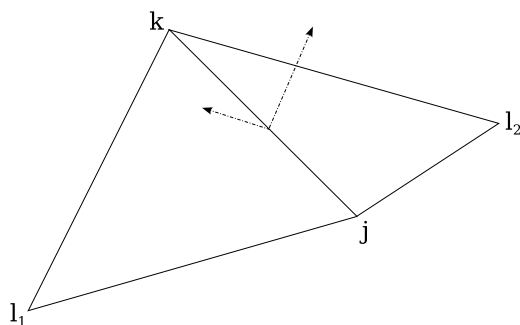


FIG. 5.8 – Voisinage d'une arête  $e = (j, k)$ , considéré dans le calcul de la relaxation non uniforme de Guskov *et al.* [43].

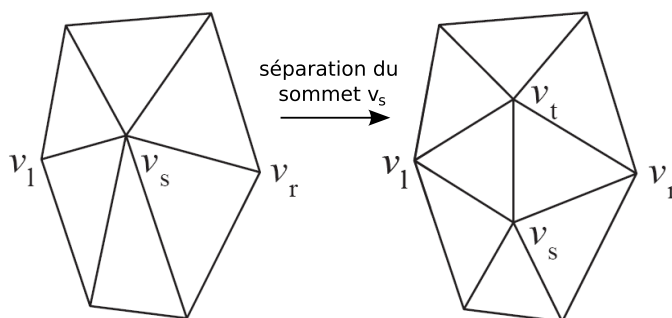


FIG. 5.9 – Illustration de l'opérateur de séparation de sommet (inverse de la contraction d'arête), intervenant dans la construction des *PM* [45].

paramétrisé sur un masque planaire régulier. Ceux-ci sont alors considérés comme des filtres semi-uniformes car les poids ne dépendent que du schéma planaire et pas de la géométrie. De cette façon les filtres affectent à la fois la géométrie et la paramétrisation.

#### 5.4.2 Principes généraux considérés par les deux approches

Les schémas de subdivision considérés (dont les poids dépendent de la géométrie et pas seulement de la connectivité), s'appuient sur une procédure de relaxation non-uniforme. Le but est de minimiser les différences entre normales associées à deux triangles voisins ("divided differences" ou différence de second ordre). L'opérateur de relaxation non uniforme sous-jacent, généralise alors la notion de filtre passe-bas, utilisé comme fonction d'échelle dans l'analyse multirésolution. Il consiste en effet à minimiser l'énergie de la différence entre ces normales, ce qui revient bien à un lissage du maillage. Ainsi pour une fonction  $g : \mathcal{V} \rightarrow \mathfrak{R}$ , les auteurs définissent :

$$D_e^{[2]} g := \sum_{i \in \omega(e)} c_{e,i} g(i).$$

où les coefficients  $c_{e,i}$  sont donnés dans l'article [43]. Dans un cadre surfacique, comme celui des maillages, la fonction  $g$  est remplacée par la position de chaque nouveau sommet  $p$  à prédire (obtenu par la séparation de sommet, illustrée à la figure 5.9).



La relaxation est calculée localement et basée sur les fonctions de coordonnées des voisins dans le domaine paramétrique (*i.e.* le niveau immédiatement plus grossier). Ainsi l'opérateur de relaxation  $E(g)$  est linéaire pour le voisinage associé, étant donné qu'il correspond à la minimisation d'une fonctionnelle quadratique :

$$E(g) = \sum_e \left( D_e^{[2]} g \right)^2.$$

Le principe du raffinement, permettant de passer d'un niveau  $Q^{(n-1)}$  à  $Q^{(n)}$  applique tout d'abord la relaxation au nouveau sommet  $n$ . Son 1-voisinage dans le polyèdre  $Q^{(n-1)}$  va alors être relaxé en tenant compte de la nouvelle position de  $n$ , de façon à donner un aspect lisse à la géométrie de cette subdivision, sans affecter la forme des triangles.

Plusieurs applications de cette relaxation sont illustrées dans l'article, comme le lissage ou son opposé (le réhaussement de détails), le filtrage, l'édition multirésolution précédemment introduite sous forme semi-uniforme par Kobbelt *et al.* [59] et enfin le placage de texture. Pour la compression, étant donné que les poids du schéma de subdivision proposé dépendent de la paramétrisation du maillage original, il ne pourrait servir que de prédicteur pour la dimension géométrique seule. Dans ce cas, il faudrait que le codeur et le décodeur partagent l'information paramétrique sous-jacente, ce qui implique un surcoût par rapport aux méthodes utilisant un remaillage. C'est pourquoi nous avons souhaité adapter ces filtres à des structures semi-régulières pour lesquelles les informations topologiques et paramétriques sont réduites au maximum, pour éviter ce surcoût. Avant de passer à notre adaptation, expliquons tout d'abord le principe de l'amélioration considérée dans l'article plus récent de Guskov *et al.* [41].

### 5.4.3 Principe de la seconde approche

L'amélioration proposée par Guskov *et al.* dans l'article [41], permet de traiter encore mieux les parties caractéristiques des maillages (arêtes vives, coins ...) alors que dans la première approche ces parties n'étaient pas considérées par la fonctionnelle. Ainsi un pré-traitement était nécessaire pour les identifier au préalable.

Cet algorithme a la particularité de proposer une modification du schéma de prédiction de 1999, pour mieux prédire les formes possédant des arêtes vives (intervenant dans l'animation de personnages par exemple) et bénéficier d'une compression anisotrope.

Dans cet article, le prédicteur est amélioré au niveaux des parties caractéristiques grâce à une modification anisotrope de la relaxation (ne nécessitant pas de pré-traitement) et également pour minimiser l'ensemble des ondelettes du maillage. L'opérateur de relaxation anisotrope est défini de la façon suivante :

$$E(g) = \sum_e \omega_e \left( D_e^{[2]} g \right)^2.$$

où pour une arête  $e$  adjacente à deux faces  $t_1$  et  $t_2$ , le poids correspondant est calculé comme étant  $\omega_e := \epsilon_\omega + e^{-(n_{t_1} \cdot n_{t_2})/2\sigma_\omega^2}$ .

Les normales  $n_t$  sont calculées dans le domaine paramétrique. Pour cela, les valeurs suivantes sont utilisées :  $\epsilon_\omega = 0.1$  et  $\sigma_\omega = 0.3$ .

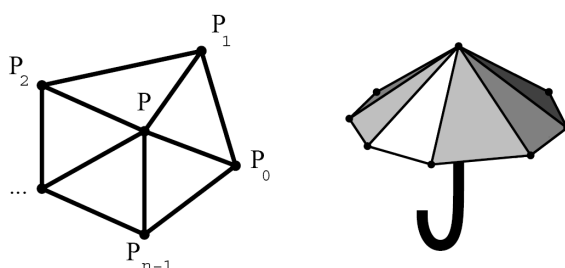


FIG. 5.10 – Illustration du concept de  $K_i$ -gon régulier sur un maillage planaire (à gauche) ou une 2-variété (à droite). Image tirée de [59].

Cette approche a été choisie par Guskov *et al.* [40] pour compresser des séquences de maillages isomorphes (de même connectivité) par transformée en ondelettes. Pour plus de détails, le lecteur est invité à se reporter à la section 2.2.1.

#### 5.4.4 Notre adaptation de ces relaxations

C'est à partir de la remarque émise par Guskov *et al.*, lorsqu'ils comparent dans l'article [43], le lissage obtenu par des filtres semi-uniforme et non uniforme, que nous avons eu l'idée d'adapter leur méthode de relaxation pour les maillages à connectivité de subdivision. Nous avons ensuite comparé cette adaptation à celle obtenue en considérant l'approche plus récente de Guskov *et al.* [40]. Les deux adaptations considérées sont respectivement nommées "relax1" et "relax2" par la suite.

Les auteurs comparent ainsi (dans [43]) leur méthode de relaxation avec le schéma semi-uniforme introduit par Kobbelt *et al.* [59]. Ces derniers supposent que le 1-voisinage d'un sommet  $i$  est paramétrisé sur un  $K_i$ -gon régulier, comme illustré à la figure 5.10. Kobbelt *et al.* utilisent alors le laplacien discret pour lisser le point  $i$ . Pour cela, ils le remplacent par la moyenne de ses voisins. La méthode de Guskov *et al.* [43] est alors une généralisation naturelle non uniforme de la méthode précédente, utilisant un voisinage plus étendu pour des surfaces visuellement plus lisses.

Le schéma semi-uniforme de Kobbelt *et al.*, pour lequel les poids ne dépendent que de la connectivité, tente de faire ressembler chaque 1-voisinage à une structure régulière. Ainsi la triangulation est généralement modifiée globalement, ce qui produit des effets indésirables (dans des applications comme l'édition ou le placage de texture), comme le montre l'image du milieu de la figure 5.11. Contrairement à cela, le schéma de Guskov *et al.* [43] laisse les triangles inchangés, pour une subdivision plus adaptée à la géométrie, comme le montre l'image de droite.

Nous avons étudié plusieurs adaptations différentes, pour considérer d'avantage les aspects géométriques dans l'étape de prédiction. Ainsi à la place de la contraction d'arêtes initialement utilisée pour l'analyse, nous avons adopté le contexte de la subdivision inverse dans une fenêtre locale. L'application de l'opérateur de relaxation (décrit précédemment) après une première prédiction Butterfly nous a donné les résultats les plus prometteurs. Une nouvelle prédiction est alors construite à partir de la première, pour appliquer l'opérateur de relaxation à chaque nouveau sommet, en fonction des positions des voisins obtenues suite à la première prédiction.

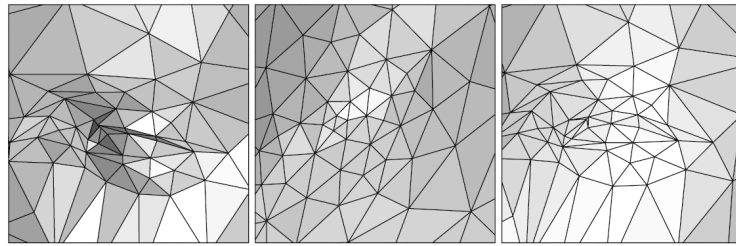


FIG. 5.11 – Comparaison du lissage sur l’oeil du modèle "Mannequin" (illustré à gauche) avec le schéma non uniforme de Guskov et al. [43] (à droite) et un schéma semi-uniforme (milieu). Image tirée de [43].



FIG. 5.12 – Comparaison de la subdivision (sur 4 niveaux) produite par le filtre de Butterfly de Zorin *et al.* [129] (à gauche) et par notre adaptation de la technique de relaxation de Guskov *et al.* [43] (à droite).

Dans les formulations précédentes, chaque nouvel élément est créé par séparation de sommet, puis prédit par l’opérateur de relaxation (à partir des paramétrisations sous-jacentes). Dans notre adaptation, nous avons proposé de procéder à une première prédiction (Butterfly) de l’ensemble des nouveaux sommets ajoutés par subdivision canonique. Les nouvelles positions prédites sont alors mémorisées de façon à ce que les calculs de relaxation ne s’effectuent qu’à partir de cette première prédiction. On tente ainsi de corriger la première prédiction en tenant compte de la géométrie et aussi de l’anisotropie.

Pour évaluer la qualité de nos prédicteurs, nous les avons utilisés comme schémas de subdivision. Nous avons ainsi comparé les résultats produits après application de ceux-ci et des schémas classiques sur quatre niveaux de subdivisions, sur l’objet "Nefertiti". Nous voyons sur la figure que la nouvelle étape de subdivision permet de produire des aspects moins lisses aux endroits à forte courbure.

Le tableau 5.6 présente une comparaison de la taille des fichiers de compression par ondelettes et de la distorsion produite lors de la reconstruction des objets usuels (remaillés par NM). Après la phase d’analyse multirésolution globale (par prédiction Butterfly non liftée originale et "relaxée"), seuls les 12 premiers plans de bits des infor-

Tab. 5.6 – Comparaison de la taille des fichiers de compression ondelettes (en Ko) et de la distorsion produite après analyse multirésolution globale, sur les objets usuels (remaillés par  $NM$ ). Les prédictions considérées sont le masque Butterfly non lifté usuel (BIM) et ses adaptations considérées (relax1 et relax2).

'#  $V_{sr}$ ' : nombre de sommets du modèle semi-régulier considéré.

' $d_H$ ' : distance de Hausdorff relativement à la diagonale de la boîte englobante de l'objet (les chiffres doivent être multipliés par  $10^{-4}$ ).

	Venus	Horse	Feline	Rabbit
# $V_{sr}$ (# niv.)	163 842 (6)	112 642 (5)	258 046 (5)	70 658 (5)
Taille BIM	20,30	29,11	52,60	15,21
$d_H$ BIM	1,38	0,215	1,39	8,06
Taille BIM relax1	19,96	30,76	58,43	14,62
$d_H$ BIM relax1	1,47	0,220	1,37	8,52
Taille BIM relax2	19,96	33,92	58,49	14,62
$d_H$ BIM relax2	1,47	0,212	1,36	8,43

mations géométriques de chaque région ont été codés.

A bas débit, les courbes sont proches, mais c'est la traditionnelle prédiction Butterfly [129] qui prédomine, sauf à plus haut débit où nous avons remarqué que le schéma "relaxé" est parfois meilleur pour le modèle "Venus". Les courbes de la figure 5.13 illustrent cette constatation pour le modèle "Venus". Nous n'avons pas fait figurer les mêmes courbes pour les autres objets, mais au vu des résultats du tableau 5.6, ce sont les mêmes tendances qui se remarquent.

Au vu de ces résultats partiels, une plus grande attention est nécessaire sur cette adaptation avant d'envisager une utilisation en local de ces schémas. De plus, le fait que seulement très peu de différences soient remarquées entre les deux approches que nous avons considéré (relax1 et 2), indique que l'adaptation n'a pas forcément été optimisée.

## 5.5 Résultats et applications possibles de notre "framework"

Il y a beaucoup d'applications pour lesquelles la redondance causée par notre analyse partitionnée pourrait être un avantage, comme la correction d'erreurs lors de la transmission canal d'un flux 3D ou le tatouage. Avant d'exposer ces applications, il peut d'abord être intéressant d'évaluer cette information additionnelle, en comparaison des méthodes d'analyse globale. Ainsi nous présentons tout d'abord une comparaison entre ces deux considérations sur les modèles 3D usuels. Nous avons appliqué différents schémas de compression sur un objet de synthèse préalablement segmenté. Les améliorations en termes de débit/distorsion que nous avons obtenus prouvent bien qu'une décomposition adaptée peut compenser la quantité d'information additionnelle nécessaire au codage indépendant des patches.

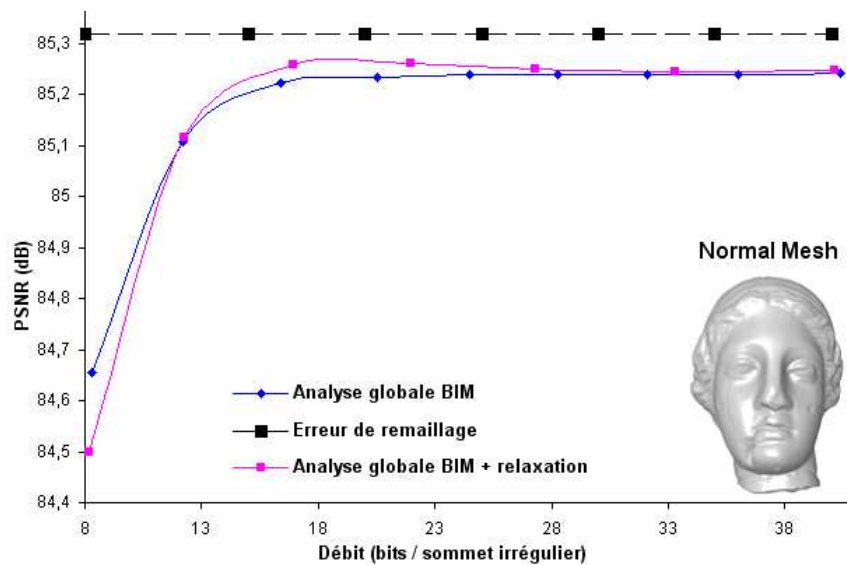


FIG. 5.13 – Comparaison des courbes débit/distorsion (à haut débit) sur l'objet Venus, entre une prédiction réalisée par le filtre de Butterfly de Zorin *et al.* [129] (BIM) et notre adaptation de la technique de relaxation de Guskov *et al.* [43].

### 5.5.1 Ordre de grandeur des informations additionnelles à coder

La figure 5.14 présente plusieurs courbes débit/distorsion pour les objets 3D considérés précédemment, selon si l'on considère une analyse multirésolution globale ou locale (basée sur l'une ou l'autre des segmentations présentées précédemment). La distorsion a été calculée avec l'outil "Mesh" [3], plus rapide et flexible que son ancêtre "Metro" [16]. Nous pouvons percevoir la quantité d'information additionnelle nécessaire lors de l'analyse locale, basée sur les deux segmentations différentes issues des deux règles d'agrégation (les mêmes que celles présentées au chapitre précédent). Cette comparaison entre méthodes globale et locale considère un traitement uniforme pour toutes les régions de la version locale, avec le même schéma que celui utilisé globalement. Au niveau de la répétition des informations aux frontières, les considérations analysées à la section précédente ayant fourni les meilleurs résultats, ont été choisies.

Le coût additionnel produit par notre "framework" local, lorsque le même type de traitement est considéré pour chaque patch (comme si on traitait globalement l'objet) peut être évalué à 3 ou 4 dB en moyenne, pour des taux supérieurs à 0,5 bit par sommet. Les partitions construites avec notre deuxième règle d'agrégation donnent de meilleurs résultats pour ce type d'analyse. Ceci peut s'expliquer puisqu'un plus petit nombre de partitions est en général créé, impliquant moins d'informations additionnelles, telles qu'analysées dans le tableau 4.2 du chapitre précédent.

Le temps considéré pour la reconstruction est celui mis pour reconstruire uniformément le modèle d'origine (sur l'ensemble des niveaux de décomposition et en considérant les 12 premiers plans de bits). La reconstruction n'est pas pour autant sans perte, à cause d'une part du remaillage et des erreurs d'arrondis lors du décodage, qui apparaissent même lorsqu'un nombre de plans de bits maximal est considéré. Si le temps de codage est plus important que le reste, c'est parce qu'il est nécessaire d'exécuter

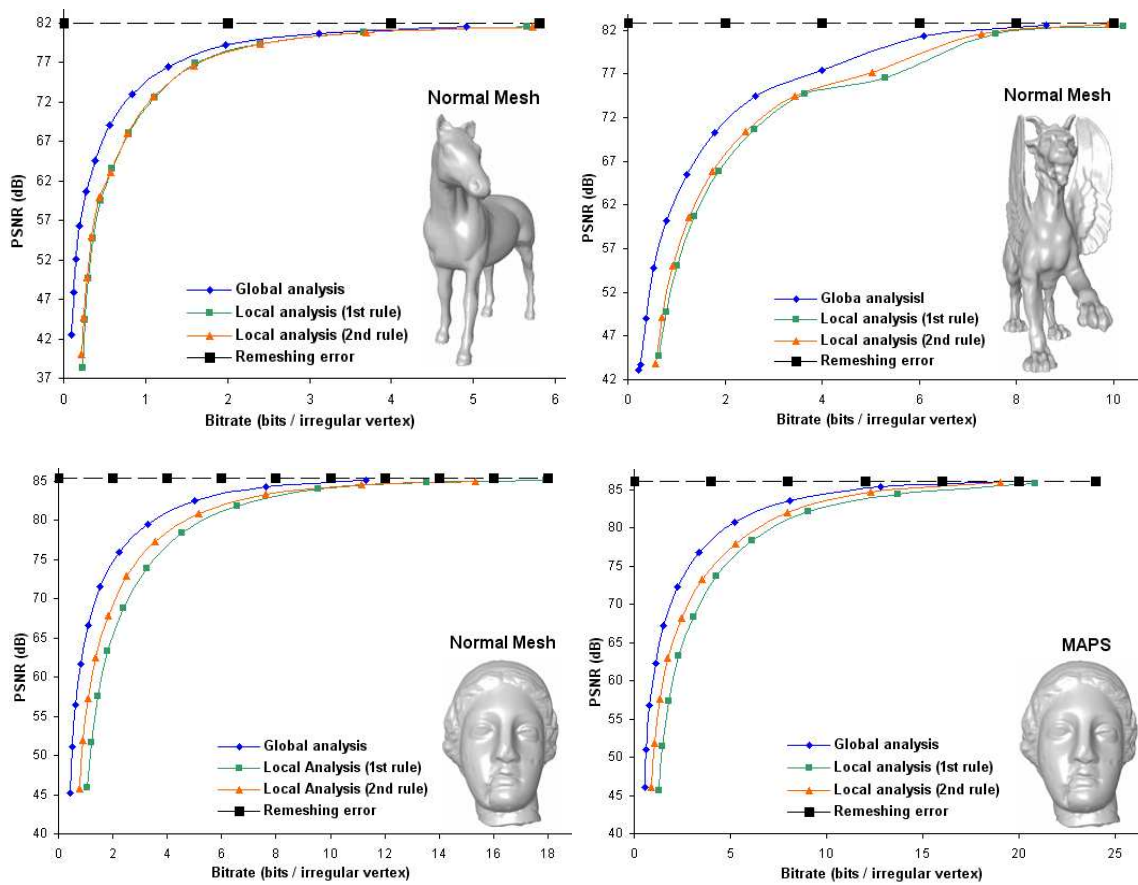


FIG. 5.14 – Comparaison des courbes débit/distorsion entre les méthodes globale et locale, pour les modèles 3D usuels remaillés par l’algorithme *NM* ou *MAPS*. Les partitionnements utilisés en amont de l’analyse locale sont basés sur l’amplitude des coefficients d’ondelettes.



TAB. 5.7 – Temps d'exécution (en secondes) des différentes étapes de notre "framework", pour les objets remaillés par l'algorithme NM.

'#  $V_{sr}$ ' : nombre de sommets du modèle semi-régulier considéré. '# niv.' : nombre de niveaux de résolution. '# reg. 1' : nombre de régions produites par la première règle d'agrégation, et '# reg. 2' : par la seconde (cf. section ??).

	Venus	Skull	Feline	Rabbit
# $V_{sr}$ (# niv.)	163 842 (4)	131 074 (4)	258 046 (5)	70 658 (5)
# reg. 1 / # reg. 2	11 / 5	6 / 2	11 / 9	4 / 3
Tps analyse locale	9,8 / 8,9	7,9 / 7,2	14,9 / 27,8	4,0 / 3,9
Tps codage total	31,8 / 30,8	25,1 / 23,0	47,4 / 45,7	12,8 / 13,4
Tps décod. + reconstr.	30,1 / 30,1	23,1 / 22,2	29,1 / 28,1	15,2 / 14,3

différents traitements de façon à s'assurer que les opérations seront reproductibles au décodage. Cela ne représente pas un gros inconvénient, vu que le codage est réalisé une seule fois au niveau du serveur.

Faute d'avoir pu proposer des nouveaux schémas de prédiction efficaces, nous présentons dans la section suivante, un objet de synthèse conçu pour montrer que la redondance introduite par le partitionnement peut être compensée par un traitement adapté à chaque région.

### 5.5.2 Analyse multirésolution séparée sur un objet de synthèse

Pour étudier le comportement de la compression lorsque des traitements différents sont appliqués sur les régions obtenues par segmentation préalable, nous voulions nous faire une idée des résultats envisageables sur un objet simple, afin de confirmer nos impressions.

Ce modèle, représenté sur l'image (b) de la figure 5.15, a été conçu en appliquant successivement quatre niveaux de subdivision sur le maillage grossier illustré sur l'image (a), chaque subdivision étant suivie d'un léger ajout de bruit blanc Gaussien uniforme. Notre but est de produire une région quasiment plate en opposition à une autre partie presque lisse. Les résultats montrent que la partie plate peut être mieux prédite avec le schéma simple midpoint, alors qu'une "prédiction lisse" est plus appropriée pour l'autre région. Ce traitement peut être réalisé grâce à la segmentation préalable, illustrée à la figure 5.15. La figure suivante (5.16) présente les courbes débit/distorsion comparées pour les méthodes globale et locale, où le débit est exprimé en bits par sommet semi-régulier. L'amélioration en termes de performance de codage est évidente pour des débits supérieurs à 2 bits/sommet.

### 5.5.3 Autres exemples d'applications possibles

Nous présentons pour finir d'autres applications que la compression adaptative, envisageables à partir de notre "framework". Premièrement, si l'utilisateur n'est pas intéressé par la visualisation de certaines régions, il est possible de lui envoyer seulement

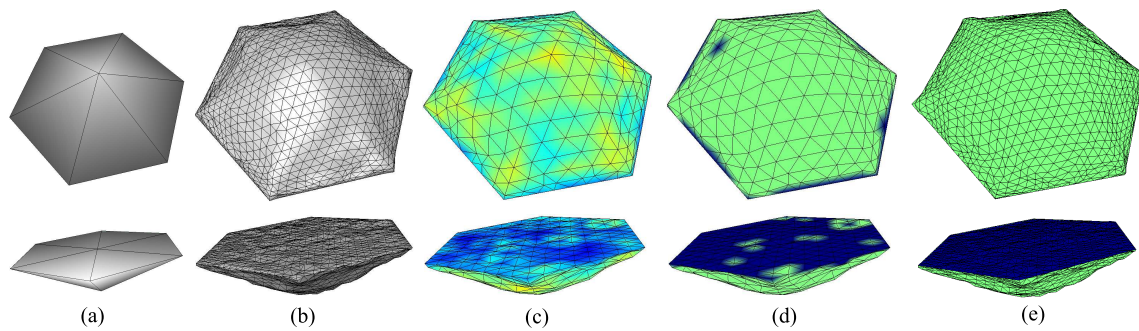


FIG. 5.15 – Segmentation d’un modèle synthétique (b) produit après application de quatre niveaux de subdivision canonique sur un polyèdre très simple (a). La subdivision est suivie par un ajout de bruit blanc Gaussien uniforme. (c) Distribution moyenne de l’amplitude des coefficients d’ondelettes sur le premier niveau de résolution obtenu par subdivision midpoint. (d) Classification initiale en deux clusters sur le même niveau, (e) et finale après fusion de régions.

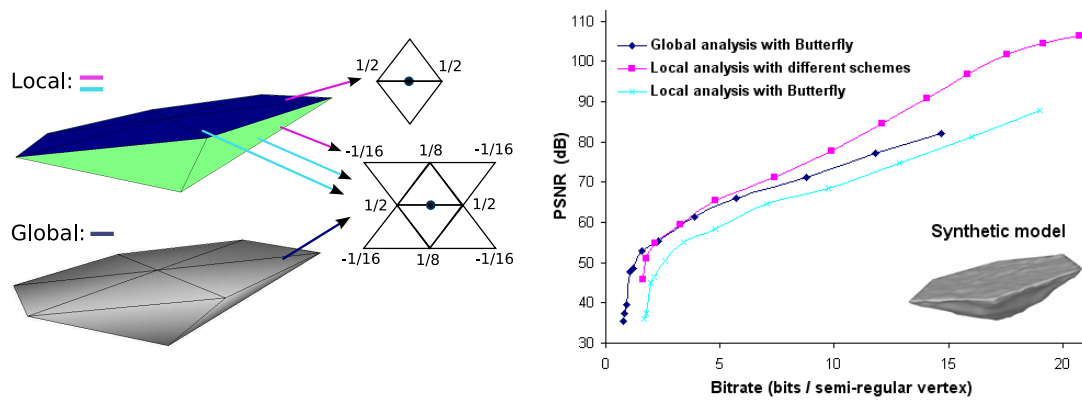


FIG. 5.16 – Comparaison des courbes débit/distorsion obtenues en utilisant une analyse en ondelettes globale ou locale sur un objet de synthèse (à droite). Les schémas de gauche mettent l’accent sur la possibilité d’utiliser différents schémas de prédiction lors de la compression locale, et présentent plus particulièrement ceux que nous avons considéré.

les informations les plus grossières liées à celles-ci, sans aucune ondelette. Dans certains cas, ce sera parce qu'elles seront cachées ou jugées non intéressantes par l'utilisateur, dans d'autres, parce qu'en appliquant simplement la subdivision sur ces partitions, une bonne approximation sera produite (les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque ces régions sont identifiées lisses). Ce type d'approximation est tout à fait acceptable sur des écrans à basse résolution. De plus, puisque notre algorithme de partitionnement de maillages isole généralement des éléments caractéristiques des maillages, correspondant à des parties sémantiques, la sélection de l'utilisateur peut être plus rapide qu'avec les méthodes actuelles. En effet, au lieu d'indiquer un ensemble de facettes correspondant à la région souhaitée, une sélection de partition sera plus rapide et commode. Dans ce contexte, notre première règle d'agrégation donne de meilleurs résultats, sauf pour le modèle "Horse" pour lequel les deux sont comparables.

La figure 5.17 présente différentes reconstructions, produites en considérant une quantification des 12 premiers plans de bits des coordonnées. Pour chacun des modèles considérés, nous avons spécifié la taille compressée correspondante en Ko et l'erreur de reconstruction (distance de Hausdorff obtenue avec l'outil "Mesh", à multiplier par  $10^{-4}$ ). Nous avons également précisé, pour chaque classification considérée, les pourcentages de régions rugueuses et d'arêtes situées en frontière de patches. La première colonne illustre les résultats obtenus avec l'analyse globale, alors que les autres ont été produites par notre "framework", sans considérer les ondelettes sur les partitions lisses (en vert sur les images de classification). Les deuxième et cinquième colonnes présentent les deux classifications sous-jacentes ayant servi à produire ces résultats, avec nos deux règles d'agrégation.

La première chose à observer est que la subdivision seule (appliquée sur les régions lisses) produit une bonne approximation avec une erreur plus faible qu'en utilisant le schéma le plus simple (midpoint). C'est pourquoi, comparé aux travaux de compression par parties de Cheng *et al.* [15], nous proposons un meilleur lissage des parties considérées "non caractéristiques", engendrant un meilleur rendu. Pour le modèle "Horse", cette approche locale "sélective" produit une taille de compression environ deux fois moins importante que celle obtenue par l'approche globale, pour une reconstruction qui préserve les caractéristiques importantes de l'objet et déforme légèrement la partie dominante lisse. Ces approximations peuvent être suffisantes pour une visualisation sur des appareils à faible résolution d'écran. La réduction de taille est moins importante sur l'objet "Feline", puisqu'un plus grand pourcentage de parties non lisses intervient.

Nous nous sommes par la suite intéressés au cas où le point de vue de l'utilisateur se focalise sur une partie caractéristique du maillage, comme par exemple, la tête du modèle "Horse". La figure 5.18 illustre les différentes reconstructions obtenues à l'aide de la méthode d'analyse globale (représentée en haut de la figure) et de notre approche locale (en bas), pour laquelle la segmentation sous-jacente est rappelée. Dans ce dernier cas, notre méthode locale ne transfère et ne décompresse (dans un premier temps) que les détails associés à la région considérée. Les coefficients d'ondelettes restants ne sont transférés que lors d'un changement de point de vue.

Dans ce contexte, nous avons comparé la taille du fichier compressé permettant ces deux reconstructions, lorsque la distorsion locale calculée au niveau de la tête du modèle (à l'aide de la distance de Hausdorff) est équivalente. Ainsi pour une même qualité de

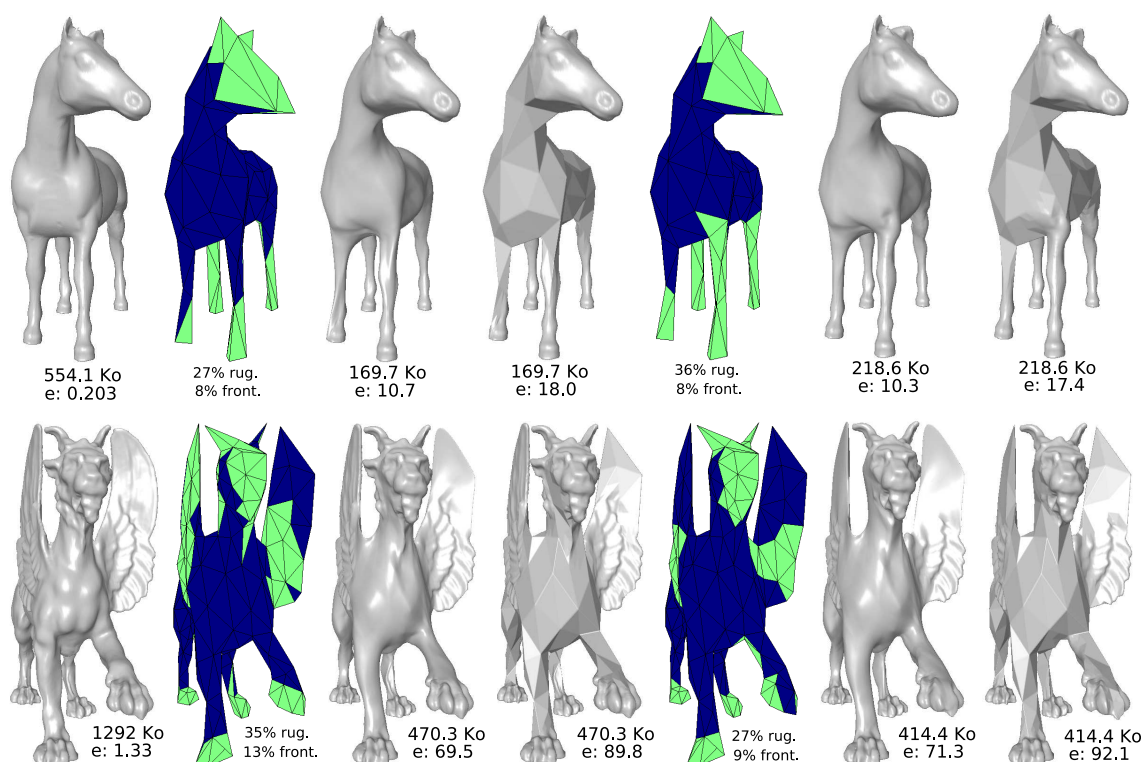


FIG. 5.17 – Reconstructions possibles en utilisant notre "framework" local et en considérant une quantification des 12 premiers plans de bits des coordonnées, pour deux objets 3D. Colonne 1 : reconstructions obtenues suite à une décomposition globale en ondelettes ; Colonne 2 et 5 : Classifications en deux clusters construites à partir des deux règles et projetées sur le maillage le plus grossier (cluster lisse : en bleu foncé) ; Colonne 3 et 6 : reconstructions produite par subdivision Butterfly non lifté, suivie de l'ajout des ondelettes dans les parties non lisses ; Colonne 4 et 7 : mêmes types de reconstructions mais en utilisant la subdivision midpoint dans les zones lisses. Nous avons reporté les taux de compression et l'erreur  $L^2$  (à multiplier par  $10^{-4}$ ).

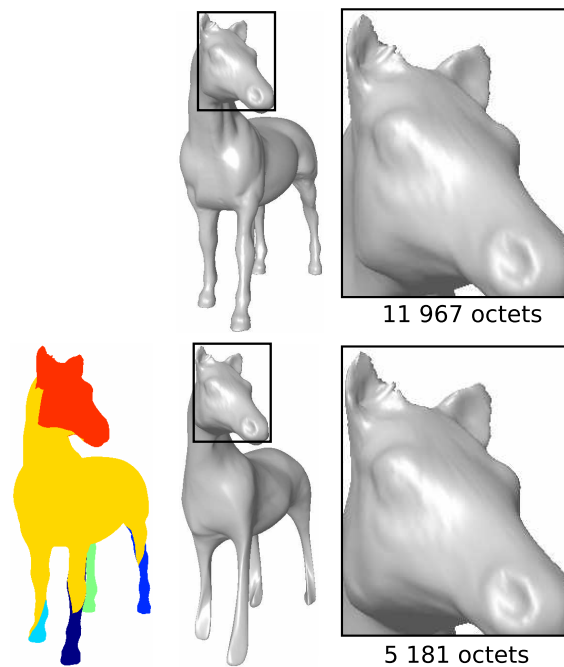


FIG. 5.18 – Comparaison de la taille du fichier compressé pour le modèle "Horse" reconstruit avec les méthodes d'analyse globale (en haut) et locale (en bas). Pour les deux reconstructions considérées, la distorsion locale calculée au niveau de la tête du modèle est équivalente.

reconstruction perçue par l'utilisateur, lorsqu'il s'intéresse uniquement à la région de la tête du modèle "Horse", notre approche permet d'obtenir un fichier compressé de plus de deux fois moins d'octets. A l'heure actuelle, les régions d'intérêt qu'il est possible de considérer sont étroitement liées à la segmentation sous-jacente à notre méthode, qui la plupart du temps isole les parties caractéristiques des modèles. Nous gardons comme perspective le décodage par régions d'intérêt, où la région et le degré d'intérêt pourraient être spécifiés par l'utilisateur, ce que très peu de méthodes proposent actuellement.

La figure 5.19 présente enfin une comparaison visuelle (avec agrandissement) de deux reconstructions du modèle "Horse", obtenues par la meilleure approche locale et la technique globale, pour une même distance de Hausdorff ( $e_1$ ). Les résultats mettent en valeur que pour une même distorsion, notre reconstruction préserve mieux les caractéristiques haute fréquence (pattes et tête), pour lesquelles un plus grand nombre de bits ont été alloués que pour le corps. Ceci est d'ailleurs mis en avant par la deuxième mesure de distorsion considérée, précisée en bas de chaque modèle reconstruit ( $e_2$ ). Cette mesure, basée sur le système visuel humain, a été introduite par Lavoué et al. [64] en 2006 et permet de mieux caractériser les reconstructions d'un point de vue de la rugosité. En effet, les calculs de distances géométriques classiques (métriques "Metro" ou "Mesh") ne sont pas corrélés avec la perception visuelle humaine.

La métrique asymétrique de Lavoué et al. [64], appelée MSDM (Mesh Structural Distortion Measure) repose sur une analyse locale de la courbure des maillages. Les objets sont ainsi comparés et évalués de façon plus subjective, en se basant sur l'évaluation humaine d'un ensemble d'objets ayant des distorsions différentes. Celle-ci fournit alors

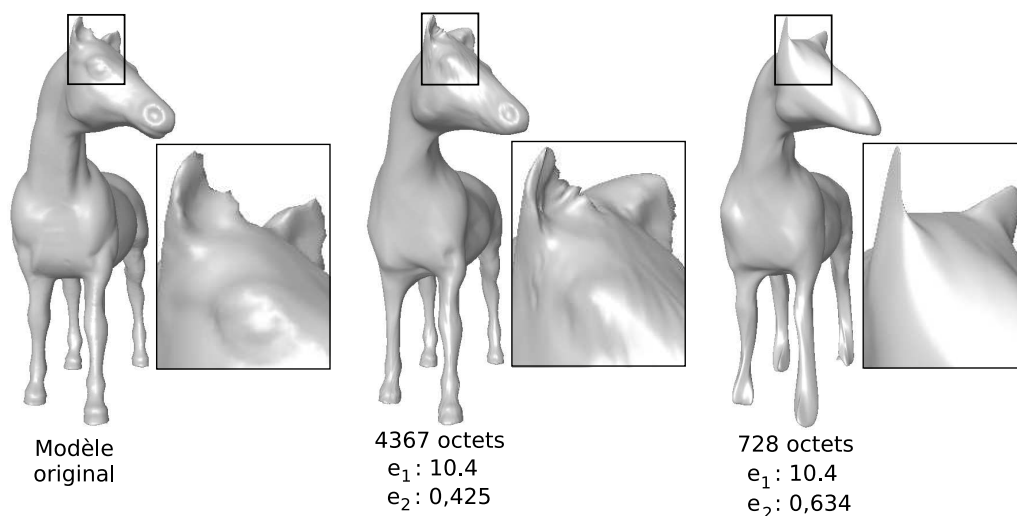


FIG. 5.19 – Détails de la reconstruction du modèle Horse basée sur des considérations globale et locale, pour une erreur de reconstruction similaire (en considérant la distance de Hausdorff). La figure de gauche rappelle le maillage irrégulier d'origine. La reconstruction présentée au milieu a été produite à partir de notre "framework" où la subdivision est suivie d'une addition des coefficients d'ondelettes uniquement dans les régions non lisses. La reconstruction de droite provient d'une considération globale. Nous avons reporté les tailles de fichiers en octets et deux mesures de distorsion  $e_1$  et  $e_2$  correspondant respectivement à la distance de Hausdorff (à multiplier par  $10^{-4}$ ) et la métrique asymétrique MSDM (introduite par Lavoué et al. [64]), pour chaque reconstruction considérée.

un score reflétant la distance perceptuelle entre deux objets 3D. Ses valeurs tendent vers 1 (limite théorique) lorsque les objets mesurés sont très différents visuellement et vers 0 pour des objets identiques. D'autres mesures de distorsion similaires sont détaillées dans les paragraphes suivants.

#### 5.5.4 Comparaison des reconstructions avec plusieurs métriques différentes

Lavoué et al. [64] utilisent la courbure moyenne, la variance et la covariance de la courbure dans des fenêtres locales, pour évaluer la similarité visuelle entre des maillages 3D. Ces différences de statistiques sont ensuite moyennées sur tout le maillage pour obtenir une distance globale (de façon similaire au calcul de la distance de Hausdorff sur l'ensemble du maillage), qui exploite le principe du système visuel humain. Pour plus de détails sur les formulations utilisées, les lecteurs sont invités à se référer à l'article correspondant [64]. A noter que cette métrique n'est définie que pour deux objets ayant la même connectivité et le même ordonnancement des sommets dans les fichiers 3D.

Une autre métrique visuelle intéressante est celle de Karni et Gotsman [53], qui contrôle la déformation géométrique ainsi que le lissage local de l'objet pour s'adapter à la sensibilité de l'œil humain. Mais de la même façon que précédemment, cette métrique a l'inconvénient de ne pouvoir s'appliquer que si la connectivité n'est pas modifiée durant l'encodage, puisqu'elle est calculée sommet à sommet.

Lavoué [61] a depuis défini une nouvelle mesure de rugosité basée sur la différence asymétrique des courbures moyennes entre le maillage original et une version lissée. Le lissage considéré est une adaptation du lissage Laplacien défini par Taubin [117]. Un



paramètre d'échelle est utilisé pour éviter que le lissage ne soit trop dépendant de la connectivité et de la densité des maillages. Le lissage obtenu converge alors rapidement vers une forme lisse stable, c'est pourquoi peu d'itérations (généralement cinq) sont suffisantes.

Une valeur de rugosité est fournie pour chaque sommet d'un maillage 3D donné, en tant que mesure locale de "bruit géométrique". Les modèles analysés dans l'article correspondant [61] sont des objets différents de ceux que nous avons considérés, à part pour l'objet "Dino" pour lequel les résultats sont globalement en accord avec nos mesures proposées. Le fait d'utiliser un paramètre d'échelle afin de déterminer les fréquences des détails à considérer en tant que bruit permet en plus une identification plus précise des aspects rugueux. Cependant cette mesure est uniquement locale et sert à adapter localement des algorithmes de tatouage ou de compression. Une mesure de rugosité globale n'est pas encore envisagée.

## 5.6 Conclusion

Nous avons présenté les grandes étapes de notre "framework", permettant la compression adaptative mais aussi la transmission et la visualisation sélective de maillages surfaciques. Nous avons ainsi insisté sur le fait d'avoir envisagé différentes configurations, en fonction de l'application cible. Plusieurs résultats ont été présentés pour chacune de ces alternatives. Ces dernières ont été prévues pour faire face à une variété d'applications, de façon à s'adapter à la demande de l'utilisateur et à l'hétérogénéité des environnements rencontrés.

Des nouveaux filtres de prédiction ont été développés, en tenant compte de la paramétrisation et de l'anisotropie des structures maillées, mais de plus amples travaux devraient être menés, en considérant peut-être un autre type d'anisotropie, plus adapté aux maillages semi-réguliers.

Enfin nous avons présenté les proportions d'informations additionnelles propres à notre méthode. Ceci pourrait être un atout pour permettre la correction des erreurs produites lors de la transmission du flux 3D compressé, sur un canal bruité. Même si nos résultats d'adaptation des schémas de prédiction sont encourageants sur l'objet de synthèse présenté, ils pourraient être encore meilleurs en considérant les travaux de Sim *et al.* [110], qu'il pourrait d'ailleurs être intéressant de coupler avec ceux de Payan *et al.* [91]. Nous reviendrons de façon plus détaillée sur ces perspectives, en fin de conclusion générale.



---

# Conclusion et perspectives

## Conclusion

L'objectif de cette thèse repose sur la conception d'une nouvelle méthode d'analyse multirésolution basée sur un partitionnement surfacique d'objets naturels, modélisés par des maillages triangulaires de topologie arbitraire. Elle a plus précisément été développée dans le but d'adapter localement l'ensemble des étapes intervenant dans le processus de compression progressive de ces maillages. Le but de cette nouvelle méthode est d'adapter le transfert de ces informations au débit du réseau ainsi qu'à la capacité de stockage et de visualisation du terminal client, pour proposer une consultation efficace, flexible et adaptée à la demande de l'utilisateur.

Pour satisfaire les objectifs évoqués, nous nous sommes inspirés des travaux de thèse de Lavoué [62], qui a utilisé les surfaces de subdivision pour la compression d'objets CAO lisses par morceaux. Nous avons ainsi étendu cet algorithme afin de proposer une méthode générique de compression de surfaces 2-variétés denses (non nécessairement lisses par morceaux), qui s'adapte à la demande de l'utilisateur. La méthode de compression et de transmission progressive proposée est basée sur les ondelettes géométriques, où les surfaces de subdivision servent à définir la base de fonctions d'échelle, pour envisager une analyse multirésolution de ces maillages. Cette approche repose sur le schéma proposé dans MPEG-4 [5], qui utilise un remaillage préalable des objets avant leur décomposition.

Les maillages considérés peuvent, de plus provenir de n'importe quel algorithme de remaillage, sous réserve qu'ils renferment une structure à connectivité de subdivision. En effet, cette structure permet de rendre implicite une grande partie des informations de connectivité durant la compression. Une analyse multirésolution performante est alors possible grâce à une décomposition en ondelettes, telle que décrite précédemment.

## Contributions

Les maillages semi-réguliers usuels ont ainsi été analysés par ondelettes en considérant différents schémas de prédiction interpolante et des ondelettes à support variable. Les comparaisons obtenues montrent que la distribution spatiale de l'amplitude et de l'angle polaire des coefficients dépend beaucoup du remaillage utilisé et de ses propriétés intrinsèques. Ces mesures sur les coefficients sont celles que tout algorithme de compression tente de réduire au maximum pour proposer des taux de compression compétitifs. Ainsi le but principal de ces études a été de classifier la surface des maillages (remaillés par différents algorithmes), de façon à réduire l'hétérogénéité relativement

aux données à coder.

Notre première contribution est d'avoir proposé une méthode de segmentation basée sur les mesures ondelettes décrites précédemment, de manière à traiter localement durant tout le processus de compression, les régions ainsi produites et réduire l'hétérogénéité évoquée précédemment. Le but principal de cette approche était d'offrir la possibilité de différencier les traitements dans l'ensemble des régions (plus homogènes pour les mesures étudiées), afin de fournir de meilleurs taux de compression ou de rendre plus flexible la transmission du flux binaire sous-jacent. Au cours de cette étude, nous nous sommes aperçus que les mesures considérées avaient tendance à séparer les régions surfaciques lisses de celles présentant un aspect plus rugueux ou texturé. Nous l'avons justifié par la comparaison de nos résultats avec plusieurs mesures de rugosité introduites par Lavoué *et al.* [64]. Les segmentations que nous avons obtenues ne peuvent pas toujours être interprétées en termes de séparation de parties caractéristiques puisqu'elles servent principalement à adapter localement la compression dans les régions produites. Malgré tout, la différenciation fréquentielle produite par notre première règle d'agrégation permet souvent un repérage des parties caractéristiques de l'objet. Notre méthode pourrait ainsi également servir pour l'indexation 3D.

A partir des différentes études et comparaisons menées sur les structures semi-régulières issues de différents remaillages, deux principales remarques se sont dégagées. D'une part, les masques de prédiction basés sur les surfaces de subdivision produisent des taux de compression très compétitifs sur les zones surfaciques lisses. D'autre part, certaines régions des maillages étudiés possèdent toujours des coefficients d'amplitude ou d'angle polaire élevés, suite à une analyse multirésolution basée sur ces mêmes filtres. En effet, les hautes-fréquences ne peuvent alors pas être bien prédites en restant sur ces considérations, sachant de plus, que les poids de ces masques ne dépendent que de la connectivité et pas de la géométrie du maillage.

Pour essayer de remédier à ce dernier point et dans le but d'améliorer la prédiction des surfaces non lisses, nous avons adapté des méthodes de relaxation construites à l'origine pour le lissage et l'analyse multirésolution des maillages irréguliers. Notre but était de proposer de nouveaux masques de prédiction pour les maillages semi-réguliers qui tiennent d'avantage compte de la géométrie et notamment de l'anisotropie présente dans les régions non lisses (régions texturées, bruitées, arêtes vives, coins ...). De nouvelles investigations doivent être menées en ce sens, qui sont abordées en fin de conclusion.

La seconde contribution de ce travail de thèse est le développement d'un "framework" qui fournit la possibilité d'appliquer différents traitements de codage sur des régions spécifiquement identifiées, dans le but de réduire les coûts de compression. Ainsi, pour chacune des régions non lisses identifiées, notre chaîne de compression adaptative fournit la possibilité de choisir la meilleure prédiction adéquate, traduisant au mieux ses hautes fréquences et ses spécificités sous-jacentes. Ceci a été rendu possible grâce à notre méthode de segmentation, conçue pour séparer les coefficients d'ondelettes distribués de façon hétérogène sur la surface. Les régions d'amplitudes fréquentielles variables produites, peuvent ainsi être traitées indépendamment durant les phases de décomposition en ondelettes, de quantification et d'allocation binaire réalisées indépendamment pour chaque patch.

Nous avons jusqu'à présent montré l'intérêt de ce "framework" en termes de compression sur un objet de synthèse pour lequel l'adaptation des schémas de prédiction aux spécificités de la surface produit de meilleurs résultats que la méthode globale, pour des débits supérieurs à 4 bits/sommet. Ceci est dû au fait que la redondance produite par notre méthode peut être compensée par un traitement bien adapté à chaque région. Pour envisager une amélioration sur les objets naturels, il faudrait alors dans un premier temps, disposer de plusieurs masques bien adaptés aux aspects locaux de la surface et plus particulièrement aux points saillants ou rugosités sur le maillage, auxquels l'oeil est très sensible. Nous abordons plus précisément ces perspectives envisageables en fin de conclusion. Néanmoins, nous avons proposé une méthode de compression indépendante pour les régions produites, limitée au niveau des frontières de celles-ci. Ceci permet alors une reconstruction flexible côté client, même en supposant une transmission et une visualisation sélective, en fonction du point de vue ou de l'intérêt de l'utilisateur.

L'ensemble des travaux réalisés durant cette thèse a été regroupé dans une application logicielle développée en C++ avec la librairie CGAL (Computational Geometry Algorithms Library [49]). Elle sera prochainement intégrée à une plateforme d'outils de traitement de maillages 3D, résultat du regroupement des travaux de l'équipe M2DisCo du LIRIS. La mise en place de cette plateforme facilitera le développement de nouvelles applications comme le tatouage adaptatif, l'indexation et la correction d'erreurs lors de la transmission canal d'un flux 3D, favorisant la consultation efficace, flexible et sécurisée de ces données. Un interfaçage avec Matlab permet également d'obtenir des statistiques sur les coefficients d'ondelettes (répartition de leurs coordonnées dans un repère global ou local).

## Limitations

Les résultats expérimentaux réalisés dans le cadre de ce travail de thèse sont basés sur un petit nombre d'objets représentés sous forme de maillages surfaciques triangulaires semi-réguliers. Ceci est dû au fait qu'il est difficile d'obtenir le code ou les exécutable relatifs aux algorithmes de remaillage et que peu de maillages semi-réguliers sont mis à disposition (aucun dans le repository AIM@SHAPE [48] par exemple). Etant donné que l'objectif de cette thèse était de proposer une chaîne complète de compression/décompression de maillages, nous avons préféré utiliser dans un premier temps des outils existants pour les parties remaillage et codage zerotree. D'autre part, il est également difficile de traiter rapidement des objets 3D échangés, tant la variété des formats proposés est importante, à cause d'un manque de standardisation.

De ce fait, les objets étudiés ne renferment pas toujours l'ensemble des différents aspects rugueux que l'on peut rencontrer dans la nature. Pour remédier à ceci, nous avons également considéré plusieurs objets de synthèse produits grâce à un ajout de bruit après chaque étape de subdivision, dont un exemple a été illustré dans le dernier chapitre.

## Perspectives et problèmes ouverts

Nous présentons pour finir, plusieurs perspectives à ces travaux de thèse, regroupées par grands thèmes.

## Concernant l'ensemble des maillons de la chaîne de compression

### *Amélioration de la décomposition en ondelettes :*

Une première perspective de ce travail serait de concevoir un nouveau schéma de prédiction permettant de réduire les coefficients d'ondelettes associés à des zones non lisses, pour lesquelles les surfaces de subdivision ne réalisent pas d'aussi bonnes prédictions que sur les régions surfaciques lisses. Ceci permettrait peut-être de compenser la redondance introduite par notre technique de partitionnement surfacique. Sachant de toute façon, comme nous l'avons montré au chapitre 5, que les hautes fréquences présentes dans ces régions contribuent fortement au réalisme visuel lors de la reconstruction des objets 3D.

Nous avons tenté d'y répondre en adaptant des schémas prévus à l'origine pour des structures irrégulières et qui prennent en compte la géométrie et aussi l'anisotropie dans ces régions. Il serait nécessaire d'y passer plus de temps et envisager de coupler cette étude avec une autre mesure d'anisotropie, basée par exemple sur les directions principales de courbures, définies grâce aux tenseurs de courbure 3D de Cohen-Steiner et Morvan [19]. Pour les régions plus accidentées, l'analyse multirésolution basée sur des fonctions fractales pourrait également être envisagée. Ainsi, il faudrait également ajouter une méthode déterminant l'échelle de fréquence pour chaque région.

Une autre réponse possible à ce problème pourrait être de considérer la conception d'un modèle statistique d'analyse de la surface, sous forme de variable aléatoire. Il serait ainsi possible de modéliser l'allure générale de la répartition des coefficients d'ondelettes analysés par patch. Les éléments caractéristiques statistiques (densité de probabilité, moyenne, écart-type, variance, minimum, maximum . . .) pourraient alors servir à régénérer une surface de même aspect visuel et possédant les mêmes hautes fréquences que la surface étudiée. Ceci permettrait alors d'éviter de transmettre l'ensemble des coefficients d'ondelettes pour ces régions et ainsi réduire les taux de compression.

Il pourrait par exemple être intéressant de s'appuyer sur les travaux de Golovinskiy *et al.* [36] qui ont développé un modèle statistique pour l'analyse et la synthèse des détails de la géométrie faciale, de façon à améliorer le réalisme des modèles de visages 3D. De plus, Nguyen *et al.* [86] ont implémenté un algorithme de "rebouchage de trous" pour les maillages polygonaux, qui synthétise les détails basés sur la géométrie existante la plus proche. Associée à une détermination des détails nécessaires pour une reconstruction précise, cette approche permettrait de réduire les ondelettes.

Dans la continuité des travaux menés sur une recherche de l'anisotropie, il pourrait aussi être intéressant de disposer directement d'un remaillage suivant les contours de l'objet.

### *Concernant le remaillage :*

En effet, nous nous sommes rendus compte, que contrairement aux images numériques, l'échantillonnage des maillages au niveau de leur connectivité, ne suit pas les directions de textures, ni même de courbure. Il pourrait cependant être intéressant de proposer un remaillageur semi-régulier privilégiant des directions propres aux maillages, en fonction de leurs caractéristiques surfaciques. Ainsi une meilleure analyse en ondelettes pourrait être proposée, en différenciant les traitements dans chaque sous-bande, à la lueur de ce qui est fait pour les images. Pour cela, il serait intéressant de se ramener aux outils utili-



sés en traitement d'images, en proposant une "vue" 2D de ces structures directionnelles pour permettre de mieux visualiser les corrélations existantes.

Ainsi, pour des textures linéaires, une seule sous-bande contiendrait les informations essentielles, de façon à éliminer une partie de la corrélation du signal, non prise en compte par la plupart des méthodes actuelles. Les outils de visualisation et d'étude de la répartition des ondelettes, proposés par notre application, pourrait alors nous permettre de facilement comparer les distributions produites, par rapport aux schémas classiques. Des traitements différenciés de ces sous-bandes devraient enfin être réalisés, en prévision d'une optimisation de leur allocation binaire, pour compléter les travaux réalisés par Payan *et al.* [91].

Une dernière perspective envisageable dans ce sens serait de ne pas décomposer seulement les approximations grossières mais aussi les coefficients d'ondelettes obtenus à chaque niveau de résolution (sous forme de paquets d'ondelettes), ce qui à notre connaissance n'a jamais été réalisé pour le traitement de maillages.

#### *Optimisation de l'allocation binaire :*

Pour obtenir des meilleurs taux de compression, les méthodes d'optimisation pour la quantification des sous-bandes de coefficients d'ondelettes, grâce à une approche lagrangienne s'avèrent très concluantes. Dans le cadre de l'analyse locale, ceci consisterait à optimiser l'allocation binaire liée à chaque patch, en considérant et adaptant les travaux de Payan *et al.* [91]. Leur optimisation de la quantification, conduite par l'erreur sous-jacente à une analyse en ondelettes, produit ainsi une amélioration de la reconstruction de +2.5 dB en comparaison des méthodes classiques. Cette approche d'optimisation a également été utilisée par Parisot *et al.* [88] auparavant.

Une étude de la contribution visuelle de chaque région à l'ensemble de la surface (en termes de distorsion) serait alors nécessaire pour venir enrichir ces derniers travaux par une nouvelle optimisation, mais cette fois-ci "orientée régions". Pour cela, nous suggérons de s'inspirer des travaux de Sim *et al.* [110]. Ces derniers ont considéré le même style de formule d'optimisation, dans le cadre d'une compression basées ondelettes, mais pour optimiser cette fois-ci l'allocation binaire d'un ensemble de segments disjoints découpés sur la surface. De cette façon et grâce à cette structure de données, la redondance au niveau des frontières de régions est ainsi évitée. Cette optimisation a également été utilisée dans le but de proposer une transmission et une visualisation sélective, en fonction du point de vue de l'utilisateur.

#### *Codage zerotree :*

Nous avons mentionné précédemment que l'adaptation d'un codeur zerotree conçu initialement pour le traitement global des objets engendre des problèmes de redondance pour notre considération locale. Ceux-ci interviennent au niveau des frontières, lors du codage indépendant des régions segmentées et permettent difficilement de rivaliser avec les méthodes globales. Une première façon d'éviter ces redondances serait de développer un codeur zerotree spécifiquement adapté à ce type de partitionnement surfacique. Une autre solution est de considérer la méthode de codage zerotree de Sim *et al.*, spécialement adaptée aux fragments disjoints qu'ils ont construits. De plus, au vu des résultats de la thèse de Payan [90], il est clair que ces méthodes (de type zerotree ou EBCOT) doivent être adaptées aux contextes des maillages, de façon à produire de meilleurs ré-

sultats.

*Nouvelles métriques comme critère de distorsion :*

Enfin, nous avons vu au chapitre 5 que les métriques usuelles (basées sur la distance de Hausdorff) ne sont pas toujours bien adaptées pour le calcul de distorsion. Ceci est apparu principalement lorsque nous avons voulu comparer notre approche locale de façon sélective (par régions d'intérêt) avec les techniques classiques.

Plusieurs métriques ont pourtant été conçues pour mieux refléter les aspects perçus par le système visuel humain. La métrique de Karni et Gotsman [53] par exemple, reparamétrée par la suite par Sorkine *et al.* [111], contrôle à la fois la déformation géométrique et le lissage de l'objet pour s'adapter à la sensibilité de l'oeil humain. Ainsi la distorsion associée à des déformations globales sur l'objet (basse fréquences), tout en conservant les informations haute-fréquence (correspondant aux détails auxquels l'oeil est sensible) est plus faible que les dégradations engendrées (pour le même nombre de bits par sommets) par une quantification des coordonnées cartésiennes. C'est dans ce même style d'idée que Lavoué *et al.* [64] ont proposé une nouvelle métrique de façon à mieux caractériser les aspects rugosité des surfaces.

### Autres applications envisageables

Mis à part la compression progressive, mais aussi la transmission et la visualisation sélectives (évoquées précédemment), cette notion d'adaptabilité proposée pourrait être exploitée par plusieurs autres types d'applications.

Peu de travaux ont considéré la combinaison de la compression de maillages et la décomposition en patchs pour envisager un décodage par régions d'intérêt (ROI : Region Of Interest), comme le propose la norme JPEG2000 pour les images. Cependant une transmission sélective pour une visualisation dépendant du point de vue ou d'une région d'intérêt peut être le gage d'une plus grande rapidité de transmission et de rendu de maillages très denses. Certaines parties peuvent en effet être plus raffinées que les parties cachées ou non désirables. L'allocation binaire envisagée pour la transmission et la visualisation sélectives, pourrait ainsi être adaptée pour une compression par région d'intérêt.

Une autre application intéressante, qui pourrait bénéficier de notre "framework", sont les techniques de corrections d'erreurs lors de la transmission canal d'un flux 3D. Dans ce contexte, Park *et al.* [89] ont récemment proposé un schéma de partitionnement en deux-temps, pour éviter les dégradations lors de la reconstruction du maillage, rencontrées lorsque des erreurs de transmission ont lieu. Comme la majorité des méthodes de codage utilise une réduction de redondance pour fournir le flux le plus compact, les informations deviennent alors plus sensibles aux erreurs de transmission.

Yan *et al.* [125] ont précédemment considéré cette question, mais ont rencontré des problèmes de reconstruction car leur méthode ne peut pas garantir un partitionnement uniforme. Pour cette raison, Park *et al.* [89] ont proposé une décomposition des objets en régions lisses et plus détaillées, suivie d'une division additionnelle en plus petites parties, pour fournir des partitions de taille uniforme et surmonter les problèmes énoncés précédemment. De plus, ils ont observé que l'uniformité de l'aspect lisse dans chaque

partition facilite la dissimulation des partitions erronées.



---

# Annexes

## A.1 Présentation de la librairie CGAL

CGAL est une librairie spécialisée dans les algorithmes de calcul géométrique (projet OpenSource). Elle propose une implémentation des objets et des algorithmes utilisés couramment en géométrie algorithmique. C'est un outil robuste, flexible (utilisation de techniques de programmation génériques) et efficace (programmation orientée objet : C++ utilisant les concepts de polymorphisme).

Cette librairie se décompose en 3 grandes catégories :

- Le noyau contenant les primitives géométriques : points, vecteurs, segments, cercles, prédicats (tests d'orientation, de position ...), opérations (calculs d'intersection, de distance ...). Il fournit plusieurs types d'arithmétiques pour la représentation des objets géométriques (points, vecteurs ...);
- La librairie de base fournissant un ensemble de structures de données et d'algorithmes standard (calcul d'enveloppe convexe en 2D ou 3D, triangulation de Delaunay, diagramme de Voronoï, construction de polyèdres, de kd-trees ...);
- Un outil de support non géométrique offrant des interfaces vers d'autres packages comme par exemple : les systèmes de visualisation d'objets (GeomView, OpenGL ...) ou les types de nombres exacts (LEDA, GMP : arithmétique exacte sur les nombres réels) ...).

CGAL utilise le paradigme de la bibliothèque STL (Standard Template Library) incluse dans le langage C++, pour le développement des algorithmes géométriques. La STL définit les concepts de conteneurs, d'itérateurs, d'objets fonction et propose un ensemble d'algorithmes s'appliquant sur ces concepts. CGAL fournit également des extensions de la STL appliquées aux structures de données géométriques.

Les algorithmes de la STL utilisant des primitives algorithmiques se servent de ces primitives en tant qu'objet fonction (ou foncteur), plutôt que de transmettre un pointeur sur une fonction, car l'opération s'en trouve accélérée. Par exemple, les algorithmes de tri utilisent les opérateurs de comparaison en tant qu'objets fonction. Les algorithmes de CGAL exploitent également cet aspect générique.

## A.2 Nos choix d'implémentation : noyau et structures de données utilisés

### A.2.1 Représentation des objets géométriques

Le concept de noyau dans CGAL représente un espace euclidien à  $d$  dimensions ( $d = 2$  ou  $3$ ) utilisant des coordonnées cartésiennes (un point est représenté par un " $d$ -tuple") ou homogènes (un point est représenté par un " $(d + 1)$ -tuple"). De plus, les coordonnées peuvent être représentées par différents types de données (*double, int ...*). On peut ainsi définir plusieurs types de noyaux qui regroupent l'ensemble des primitives géométriques associées à l'espace et au type de données considérés.

Une des structures de données géométrique les plus utilisées en géométrie algorithmique est la triangulation d'un ensemble de points en deux ou trois dimensions. Elle repose sur les concepts de sommet et de cellule (ou facette en 2D) et se décompose en trois couches de classes :

- Les classes de base, qui définissent les sommets et cellules sur lesquels la triangulation est basée ainsi que les relations d'incidence et d'adjacence qui les lient ;
- La classe "structure de données de la triangulation" s'appuyant sur les classes de base. Elle fournit l'aspect combinatoire de la triangulation tout en maintenant les relations d'incidence et d'adjacence lors d'une opération d'insertion de sommets par exemple ;
- La classe "triangulation" qui implémente les aspects géométriques de la triangulation. Cette classe s'appuie sur une classe "geometric traits" déterminant les types d'objets géométriques utilisés par la triangulation ainsi que les prédicats et opérations de base sur ces objets.

Les classes génériques "geometric traits" servent en fait d'interface entre les algorithmes et les noyaux géométrique proposés par CGAL. Elles permettent la personnalisation du comportement d'un algorithme  $A$  pour un noyau donné, sans avoir à changer l'implémentation de  $A$ .

Généralement la position des sommets est codée par des nombres flottants sur 32 bits, mais la majorité des méthodes de compression géométrique ne manipule pas les coordonnées sous cette forme. Ces méthodes lui préfèrent généralement une représentation quantifiée. Cela consiste à représenter chaque valeur par un multiple entier d'une quantité  $q$ , appelée pas de quantification. Les coordonnées se retrouvent ainsi codées sur une grille régulière, ce qui est beaucoup plus pratique à gérer que les nombres à virgule flottante car on peut alors bénéficier d'une arithmétique exacte. La quantification se fait généralement sur 24, 16, 12 ou 8 bits, ce qui entraîne une perte non négligeable, mais qui est généralement compensée par les erreurs numériques limitant la précision du modèle. Ces considérations sont également utilisées pour les attributs. A la différence de nombreuses méthodes, nous n'imposons pas de quantification préalable avec perte de précision sur les coordonnées des points. Notre algorithme considère ainsi les données telles qu'elles sont présentes dans les fichiers d'entrée.

### A.2.2 Représentation des polyèdres dans CGAL

Notre application dans laquelle sont implémentés nos algorithmes se sert de la classe



"Polyhedron\_3" de CGAL pour représenter les maillages surfaciques polygonaux et donc triangulaires. Cette classe est basée sur une construction incrémentale ("incremental builder") du maillage à partir de la lecture d'un fichier VRML, OFF ou OBJ, où chaque sommet est inséré dans l'espace 3D (à partir de ses coordonnées), puis les arêtes définissant les facettes du polyèdre. Nous nous sommes inspirés du tutoriel écrit par Shiue et al. [108] qui définit l'implémentation de plusieurs schémas de subdivision à partir de la structure "Polyhedron\_3" de CGAL. Plus précisément nous avons utilisé le mécanisme appelé "modifier callback", mis en place par les mêmes auteurs pour l'implémentation de la subdivision "Quad-Triangle" introduite par Levin [69], puis Stam et Loop [113].

De plus, l'interface graphique définie dans le cadre de ce tutoriel, pour la démonstration de l'utilisation des schémas de subdivision mis en place, nous a servi de base pour notre application. Celle-ci s'appuie sur OpenGL et est développée grâce aux MFC de Microsoft Visual C++, sous Windows. En plus des schémas de subdivision, quelques fonctionnalités basiques d'interaction, d'affichage, de rendu et de visualisation sur les maillages ont été mis en place et conservés dans notre application.

La structure de données définissant un polyèdre dans CGAL est basée sur le concept des demi-arêtes qui est très pratique pour la modélisation, la manipulation et le développement d'algorithmes généraux sur les 2-variétés orientables. La classe correspondante (CGAL : :Polyhedron\_3) utilise une structure de données reposant également sur ce concept de demi-arêtes pour définir la connectivité. De façon plus précise, une demi-arête  $d$  est reliée à sa facette incidente et aux demi-arêtes précédente, suivante et opposée à  $d$  (illustrées sur le schéma de la figure A.20). De plus amples détails sur cette structure de données sont présentés dans l'article de Kettner [54].

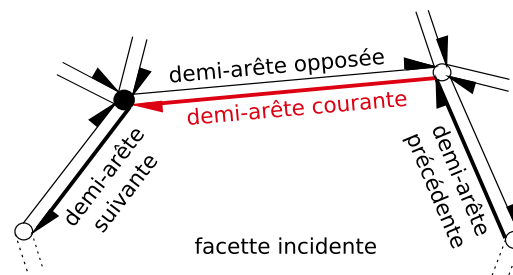


FIG. A.20 – Structure de donnée basée sur les demi-arêtes, utilisée par la classe CGAL : :Polyhedron\_3. Pour chaque demi-arête, quatre pointeurs permettent d'accéder à sa facette incidente, les demi-arêtes précédente et suivante dans cette facette et la demi-arête opposée.

Enfin, l'interface graphique définie par Shiue et al. [108], base de notre application, utilise pour les opérations basiques de rendu décrites précédemment (implémentées avec OpenGL), des itérateurs ou circulateurs pour l'assemblage des facettes du polygone. Pour proposer plusieurs modes de rendu ou définir les traitements de subdivision sur les polyèdres, la classe de base (CGAL : :Polyhedron\_3) a dû être personnalisée avec de nouveaux attributs et méthodes associés au polyèdre (qualifié de polyèdre enrichi). A savoir que les items géométriques : les sommets, demi-arêtes et facettes peuvent également être "enrichis". Les auteurs ont ainsi défini les normales aux facettes et aux sommets pour le rendu ou également la boîte englobante associée au polyèdre. Nous en avons fait de même pour définir la segmentation, la décomposition en ondelettes ainsi que nos divers autres algorithmes.

### A.2.3 Subdivision

L'élément clé pour l'implémentation d'un algorithme de subdivision est de définir efficacement l'opération de raffinement, *i.e.* les modifications de connectivité. Deux approches ont été introduites en ce sens par Shiue et al. [108] dans leur tutoriel : les opérateurs d'Euler et le mécanisme appelé "modifier callback". Ce dernier schéma est plus flexible et permet aux programmeurs de créer leur propres opérateurs combinatoires, en utilisant le constructeur incrémental (surcharge de la classe CGAL : :Modifier) pour construire le polyèdre subdivisé, à partir du polyèdre d'entrée. L'intégrité de la nouvelle structure subdivisée (construite à partir d'un maillage cible) est alors vérifiée à la fin de la construction et le maillage cible reste inchangé.

### A.2.4 Analyse et synthèse en ondelettes

Les principaux traitements proposés par notre application sont l'analyse et la synthèse en ondelettes de maillages surfaciques triangulaires. L'interface utilisateur retenue (basée sur celle de Shiue et al. [108]) est illustrée à la figure A.21, pour un exemple d'affichage des coefficients d'ondelettes sur des maillages très simples. L'analyse et la synthèse en ondelettes peuvent se baser sur différents schémas de prédiction et plusieurs filtres d'ondelettes, au travers de boîtes de dialogue.

Au niveau de la conception générale, voici ce que nous avons considéré pour l'implémentation de ces traitements. Le principe de la synthèse est très peu différent de celui de la subdivision, excepté qu'en plus de l'étape de subdivision, on ajoute des coefficients d'ondelettes à chaque nouveau sommet. Ainsi nous avons utilisé le même mécanisme de "modifier callback" (défini précédemment), qui est plus flexible que les opérateurs d'Euler et permet de plus, de conserver l'ensemble des niveaux de résolution produits pour y effectuer des statistiques.

Au niveau de l'analyse, le même mécanisme est utilisé, mais cette fois-ci en considérant la simplification de maillage (sorte de subdivision inverse), où certains sommets sont supprimés, tout en conservant les détails nécessaires à leur reconstruction après subdivision. Nous avons également proposé la possibilité de créer des objets de synthèse semi-réguliers avec ajouts de légers déplacements sous forme de bruit blanc gaussien uniforme, après plusieurs subdivisions successives. Ce traitement est très intéressant pour analyser plusieurs niveaux de rugosité, pas forcément présents dans les objets semi-réguliers à disposition.

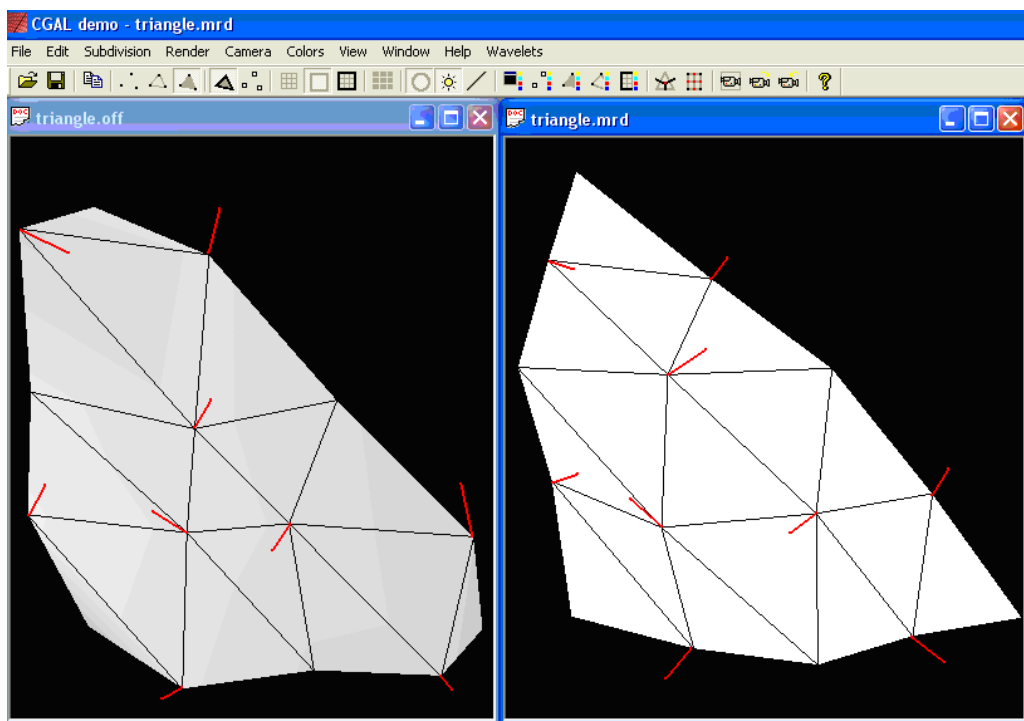


FIG. A.21 – Copie d'écran de notre application sous Windows où les coefficients d'ondelettes (champs de vecteurs 3D en rouge) associées à deux maillages de même niveau de résolution sont comparés.

### A.3 Maillages surfaciques triangulaires utilisés dans ce mémoire

Les modèles 3D utilisés dans le cadre de l'analyse multirésolution (pour lesquels nous avons disposé d'un ou plusieurs modèles semi-réguliers) et référencés à plusieurs reprises dans cette thèse proviennent de différentes sources. Ils sont présentés à la figure A.22 ainsi que leurs principales caractéristiques (dont la société ou le laboratoire qui l'ont créé), dans le tableaux A.8.

TAB. A.8 – Caractéristiques principales des maillages utilisés dans ce document (dans le cadre de l'analyse multirésolution).

BB : longueur de la diagonale de la boîte englobante normalisée.

'#  $V_{or}$ ' / '#  $F_{or}$ ' : nombre de sommets / facettes du modèle original irrégulier.

'#  $V_{sr1}$ ' / '#  $F_{sr1}$ ' : nombre de sommets / facettes du modèle original semi-régulier remaillé par NM.

'#  $V_{sr2}$ ' / '#  $F_{sr2}$ ' : nombre de sommets / facettes du modèle original semi-régulier remaillé par MAPS.

N°	Modèle	BB	# $V_{or}$	# $F_{or}$	# $V_{sr1}$	# $F_{sr1}$	# $V_{sr2}$	# $F_{sr2}$	Créateur
(1)	Venus	0,156	50 002	100 000	163 842	327 680	198 658	397 312	Cyberware
(2)	Horse	0,253	48 485	96 966	112 642	225 280	-	-	Cyberware
(3)	Rabbit	0,932	67 039	134 073	70 658	141 312	107 522	215 040	Cyberware
(4)	Feline	0,188	49 919	99 732	258 046	516 096	-	-	Stanford
(5)	Bunny	0,25	34 835	69 472	-	-	118 206	235 520	Stanford
(6)	Skull	0,241	20 002	40 000	131 074	262 144	-	-	Headus
(7)	Dinosaur	0,157	56 194	112 384	129 026	258 048	-	-	Cyberware

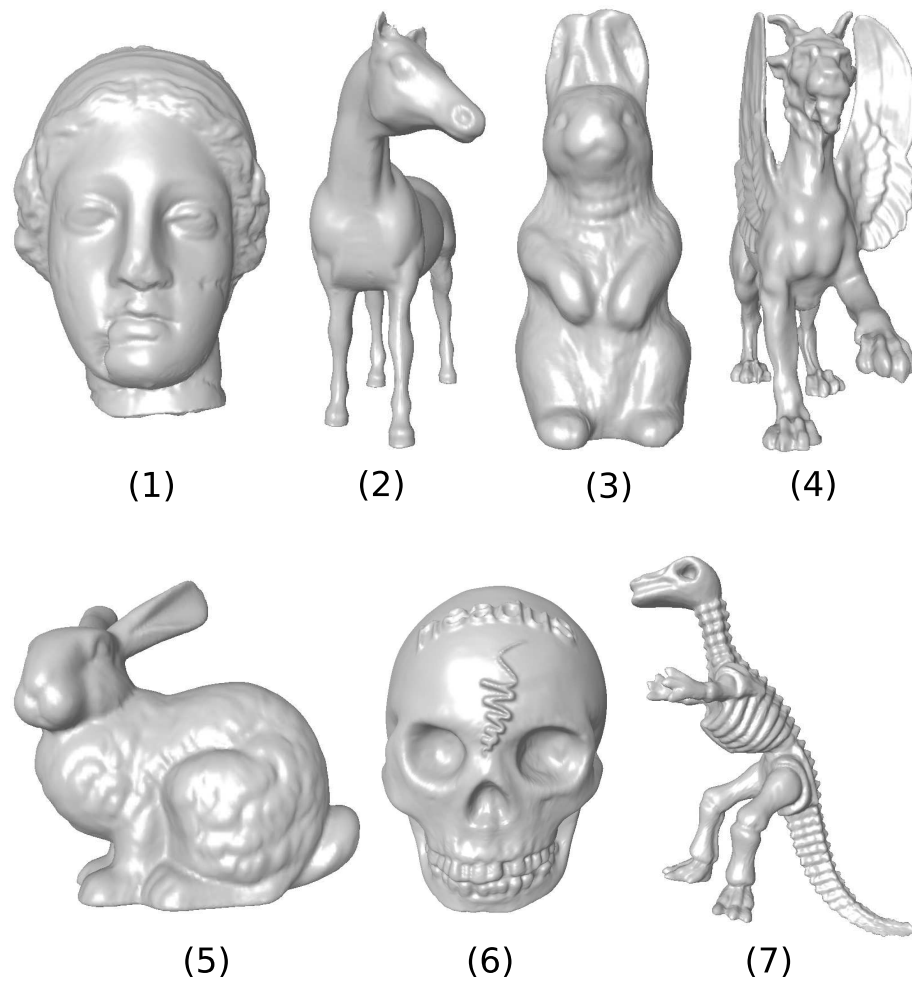


FIG. A.22 – Maillages utilisés dans ce document, dans le cadre de l'analyse multirésolution. Leurs caractéristiques principales sont indiquées dans le tableau A.8.



---

## Bibliographie

- [1] P. ALLIEZ et M. DESBRUN : Progressive compression for lossless transmission of triangle meshes. In *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 198–205, 2001. 114
- [2] P. ALLIEZ et C. GOTSMAN : *Recent Advances in Compression of 3D Meshes*. Advances in Multiresolution for Geometric Modelling. N.A. Dodgson and M.S. Floater and M.A. Sabin. Springer-Verlag, 2005. 15
- [3] N. ASPERT, D. SANTA-CRUZ et T. EBRAHIMI : Mesh : Measuring errors between surfaces using the hausdorff distance. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, volume I, pages 705 – 708, 2002. 61, 75, 141
- [4] M. ATTENE, S. KATZ, M. MORTARA, G. PATANE, M. SPAGNUOLO et A. TAL : Mesh segmentation - a comparative study. In *SMI '06 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications 2006 (SMI'06)*, page 7, 2006. 92, 109
- [5] S. BATTISTA, F. CASALINO et C. LANDE : MPEG-4 : A Multimedia Standard for the Third Millennium, Part 2. *IEEE MultiMedia*, 7(1):76–84, 2000. 4, 5, 151
- [6] M. BEN-CHEN et C. GOTSMAN : On the optimality of spectral compression of mesh data. *ACM Trans. Graph.*, 24(1):60–80, 2005. 16
- [7] M. BERTRAM : Biorthogonal loop-subdivision wavelets. *Computing*, 72(1-2):29–39, 2004. 24, 54, 55
- [8] G.-P. BONNEAU : Multiresolution analysis on irregular surface meshes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 4(4):365–378, 1998. 36
- [9] G.-P. BONNEAU et A. GERUSSI : Hierarchical decomposition of datasets on irregular surface meshes. In *CGI '98 : Proceedings of the Computer Graphics International 1998*, page 59. IEEE Computer Society, 1998. 36
- [10] G.-P. BONNEAU et A. GERUSSI : Level of detail visualization of scalar data sets on irregular surface meshes. In *VIS '98 : Proceedings of the conference on Visualization '98*, pages 73–77. IEEE Computer Society Press, 1998. 36
- [11] G.-P. BONNEAU, S. HAHMANN et G. M. NIELSON : Blac-wavelets : a multiresolution analysis with non-nested spaces. In *VIS '96 : Proceedings of the 7th conference on Visualization '96*, pages 43–48. IEEE Computer Society Press, 1996. 36
- [12] H. M. BRICENO, P. V. SANDER, L. McMILLAN, S. GORTLER et H. HOPPE : Geometry videos : a new representation for 3D animations. In *SCA '03 : Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 136–146. Eurographics Association, 2003. 42



- [13] A. CERTAIN, J. POPOVIC, T. DEROSE, T. DUCHAMP, D. SALESIN et W. STUETZLE : Interactive multiresolution surface viewing. In *SIGGRAPH '96 : Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 91–98. ACM Press, 1996. 43, 53, 69
- [14] L. CHEN et N. D. GEORGANAS : 3D mesh compression using an efficient neighborhood-based segmentation. In *DS-RT '05 : Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications*, pages 78–85. IEEE Computer Society, 2005. 113
- [15] Z.-Q. CHENG, H.-F. LIU et S.-Y. JIN : The progressive mesh compression based on meaningful segmentation. *Vis. Comput.*, 23(9):651–660, 2007. 113, 145
- [16] P. CIGNONI, C. ROCCHINI et R. SCOPIGNO : Metro : measuring error on simplified surfaces. Rapport technique, Paris, France, 1996. 61, 141
- [17] A. COHEN, I. DAUBECHIES et J.-C. FEAUVEAU : Biorthogonal bases of compactly supported wavelets. *Comm. Pure Appl. Math.*, 45(5):485–560, 1992. 19
- [18] D. COHEN-STEINER, P. ALLIEZ et M. DESBRUN : Variational shape approximation. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):905–914, 2004. 92
- [19] D. COHEN-STEINER et J.-M. MORVAN : Restricted delaunay triangulations and normal cycle. In *SCG '03 : Proceedings of the nineteenth annual symposium on Computational geometry*, pages 312–321. ACM Press, 2003. xii, 85, 88, 154
- [20] S. DELEST : *Segmentation de maillages 3D à l'aide de méthodes basées sur la ligne de partage des eaux*. Thèse de doctorat, Université François Rabelais de Tours, France, novembre 2007. 109
- [21] S. DELEST, R. BONÉ et H. CARDOT : 3d watershed transformation based on connected faces structure. In *CompIMAGE'06 : Computational Modelling of Objects Represented in Images : fundamentals, methods and applications*, octobre 2006. 93
- [22] M. DESBRUN, M. MEYER et P. ALLIEZ : Intrinsic parameterizations of surface meshes. *Eurographics conference proceedings*, 21(2):209–218, 2002. 39
- [23] D. P. DOBKIN et D. G. KIRKPATRICK : A linear algorithm for determining the separation of convex polyhedra. Rapport technique. 47
- [24] N. DYN, D. LEVIN et J. A. GREGORY : A butterfly subdivision scheme for surface interpolation with tension control. *ACM Trans. Graph.*, 9(2):160–169, 1990. 24, 25, 48, 65, 67, 68, 69
- [25] M. ECK, T. DEROSE, T. DUCHAMP, H. HOPPE, M. LOUNSBERY et W. STUETZLE : Multiresolution analysis of arbitrary meshes. In *SIGGRAPH '95 : Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 173–182, 1995. x, 39, 43, 44, 45, 46, 50
- [26] A. ELKEFI, M. ANTONINI et C. BEN AMAR : 3d scan-based wavelet transform for multiresolution meshes. 2004. 116
- [27] JPEG 2000 Part 1 Final Draft International Standard. ISO/IEC FDIS15444-1 : décembre 2000. 4, 29
- [28] M. S. FLOATER : Parametrization and smooth approximation of surface triangulations. *Computer Aided Geometric Design*, 14(4):231–250, 1997. 39, 48
- [29] M. S. FLOATER et K. HORMANN : *Surface Parameterization : a Tutorial and Survey*. Springer Verlag, 2005. 39

- [30] I. FRIEDEL, P. SCHRÖDER et A. KHODAKOVSKY : Variational normal meshes. *ACM Trans. Graph.*, 23(4):1061–1073, 2004. x, xi, 48, 49, 51, 61, 65
- [31] M. GARLAND et P. S. HECKBERT : Surface simplification using quadric error metrics. *Computer Graphics*, 31(Annual Conference Series):209–216, 1997. 38, 48
- [32] M. GARLAND, A. WILLMOTT et P. S. HECKBERT : Hierarchical face clustering on polygonal surfaces. In *SI3D '01 : Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 49–58. ACM Press, 2001. 92
- [33] A. GERSHO et R. M. GRAY : *Vector quantization and signal compression*. Kluwer Academic Publishers, 1991. 93
- [34] P. GIOIA : Reducing the number of wavelet coefficients by geometric partitioning. *Comput. Geom. Theory Appl.*, 14(1-3):25–48, 1999. x, 44, 45, 46, 53
- [35] P. GIOIA, O. AUBAULT et C. BOUVILLE : Real-time reconstruction of wavelet-encoded meshes for view-dependent transmission and visualization. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.*, 14(7):1009–1020, 2004. 23, 43, 112, 114
- [36] A. GOLOVINSKIY, W. MATUSIK, H. PFISTER, S. RUSINKIEWICZ et T. FUNKHOUSER : A statistical model for synthesis of detailed facial geometry. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, 25(3), juillet. 154
- [37] C. GOTSMAN, X. GU et A. SHEFFER : Fundamentals of spherical parameterization for 3D meshes. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):358–363, 2003. 38
- [38] X. GU, S. J. GORTLER et H. HOPPE : Geometry images. In *SIGGRAPH '02 : Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. x, 40, 41
- [39] I. GUSKOV : Manifold-based approach to semi-regular remeshing. *Graph. Models*, 69(1):1–18, 2007. 45, 50, 77
- [40] I. GUSKOV et A. KHODAKOVSKY : Wavelet compression of parametrically coherent mesh sequences. In *SCA '04 : Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 183–192. 37, 138
- [41] I. GUSKOV et A. KHODAKOVSKY : Wavelet compression of parametrically coherent mesh sequences. In *SCA '04 : Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 183–192. 49, 77, 135, 137
- [42] I. GUSKOV, A. KHODAKOVSKY, P. SCHRÖDER et W. SWELDENS : Hybrid meshes : multiresolution using regular and irregular refinement. In *SCG '02 : Proceedings of the eighteenth annual symposium on Computational geometry*, pages 264–272. ACM, 2002. 57
- [43] I. GUSKOV, W. SWELDENS et P. SCHRÖDER : Multiresolution signal processing for meshes. In Alyn ROCKWOOD, éditeur : *SIGGRAPH '99 : Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 325–334, 1999. xiii, 34, 36, 135, 136, 138, 139, 141
- [44] I. GUSKOV, K. VIDIMCE, W. SWELDENS et P. SCHRÖDER : Normal meshes. In *SIGGRAPH '00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 95–102, 2000. x, xvii, 47, 48, 50, 51, 52, 60, 64, 65, 69, 82, 91
- [45] H. HOPPE : Progressive meshes. *Computer Graphics*, 30(Annual Conference Series): 99–108, 1996. xiii, xvii, 36, 37, 113, 135, 136

- [46] H. HOPPE : View-dependent refinement of progressive meshes. *In SIGGRAPH '97 : Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 189–198, 1997. 112
- [47] HTTP ://LIRIS.CNRS.FR/SEMANTIC-3D. 16, 23, 59
- [48] HTTP ://SHAPES.AIM-AT-SHAPE.NET. 35, 153
- [49] HTTP ://WWW.CGAL.ORG. 39, 59, 153
- [50] HTTP ://WWW.MULTIRES.CALTECH.EDU/SOFTWARE/PGC/. 128
- [51] HTTP ://WWW.MULTIRES.CALTECH.EDU/SOFTWARE/PGC/DATFILE.PDF. xiii, 118, 119
- [52] D. A. HUFFMAN : A method for the construction of minimum-redundancy codes. volume 9, pages 1098–1101, 1952. 31
- [53] Z. KARNI et C. GOTSMAN : Spectral compression of mesh geometry. *In SIGGRAPH '00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 279–286, 2000. 15, 16, 76, 148, 156
- [54] L. KETTNER : Using generic programming for designing a data structure for polyhedral surfaces. *Comput. Geom. Theory Appl.*, 13:65–90, 1999. 161
- [55] A. KHODAKOVSKY, P. ALLIEZ, M. DESBRUN et P. SCHRÖDER : Near-optimal connectivity encoding of 2-manifold polygon meshes. *Graph. Models*, 64(3/4):147–168, 2002. 37
- [56] A. KHODAKOVSKY et I. GUSKOV : Compression of normal meshes. *In Geometric Modeling for Scientific Visualization*. Springer-Verlag, 2003. xi, xviii, 24, 38, 52, 54, 69, 115, 116, 130
- [57] A. KHODAKOVSKY, N. LITKE et P. SCHRÖDER : Globally smooth parameterizations with low distortion. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):350–357, 2003. x, xvii, 49, 50, 51, 61, 62, 64
- [58] A. KHODAKOVSKY, P. SCHRÖDER et W. SWELDENS : Progressive geometry compression. *In SIGGRAPH '00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 271–278, 2000. x, xi, xvii, xviii, 30, 38, 51, 52, 54, 69, 118, 128, 134
- [59] L. KOBBELT, S. CAMPAGNA, J. VORSATZ et H.-P. SEIDEL : Interactive multi-resolution modeling on arbitrary meshes. *Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series): 105–114, 1998. xiii, 37, 137, 138
- [60] A. F. KOSCHAN : Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching watersheds. *In Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, II*, pages 27–32, 2003. 92
- [61] G. LAVOUÉ : A roughness measure for 3D mesh visual masking. *In APGV '07 : Proceedings of the 4th symposium on Applied perception in graphics and visualization*. 148, 149
- [62] G. LAVOUÉ : *Compression de surfaces, basée sur la subdivision inverse, pour la transmission bas débit et la visualisation progressive*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2005. xii, 23, 59, 85, 86, 94, 151
- [63] G. LAVOUÉ, F. DUPONT et A. BASKURT : Curvature tensor based triangle mesh segmentation with boundary rectification. *In Computer Graphics International*, pages 10–17, 2004. xii, 91, 93, 94, 109

- [64] G. LAVOUÉ, E. Drelie GELASCA, F. DUPONT, A. BASKURT et T. EBRAHIMI : Perceptually driven 3D distance metrics with application to watermarking. In *SPIE Applications of Digital Image Processing XXIX*, août 2006. 85, 86, 87, 89, 147, 148, 152, 156
- [65] S. LAVU, H. CHOI et R. BARANIUK : Geometry compression of normal meshes using rate-distortion algorithms. In *SGP '03 : Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, pages 52–61, 2003. 53
- [66] A. LEE, H. MORETON et H. HOPPE : Displaced subdivision surfaces. In Kurt AKELEY, éditeur : *SIGGRAPH '00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 85–94. ACM Press / ACM SIGGRAPH / Addison Wesley Longman, 2000. 54
- [67] A. W. F. LEE, W. SWELDENS, P. SCHRÖDER, L. COWSAR et D. DOBKIN : Maps : Multiresolution adaptive parameterization of surfaces. *Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series):95–104, 1998. x, xi, xvii, 47, 48, 50, 60, 61, 64, 68, 82, 91
- [68] K.-Y. LEE, S.-C. KANG et T.-W. KIM : Remeshing into normal meshes with boundaries using subdivision. *Comput. Ind.*, 50(3). 48
- [69] A. LEVIN : Polynomial generation and quasi-interpolation in stationary non-uniform subdivision. *Compu. Aided Geom. Des.*, 20(1):41–60, 2003. 161
- [70] M. LEVOY, K. PULLI, B. CURLESS, S. RUSINKIEWICZ, D. KOLLER, L. PEREIRA, M. GINTON, S. ANDERSON, J. DAVIS, J. GINSBERG, J. SHADE et D. FULK : The digital Michelangelo project : 3D scanning of large statues. In *SIGGRAPH '00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 131–144. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000. ix, 3, 12
- [71] D. LI, K. QIN et H. SUN : Unlifted loop subdivision wavelets. In *PG '04 : Proceedings of the Computer Graphics and Applications, 12th Pacific Conference on (PG'04)*, pages 25–33. IEEE Computer Society, 2004. 54, 55
- [72] C. T. LOOP : Smooth subdivision surfaces based on triangles, 1987. 24, 47, 51, 67
- [73] S. M. LOPRESTO, K. RAMCHANDRAN et M. T. ORCHARD : Image coding based on mixture modeling of wavelet coefficients and a fast estimation-quantization framework. In *DCC '97 : Proceedings of the Conference on Data Compression*, page 221. IEEE Computer Society, 1997. 53
- [74] F. LOSASSO, H. HOPPE, S. SCHAEFER et J. WARREN : Smooth geometry images. In *Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, pages 138–145, 2003. 42
- [75] M. LOUNSBERY, T. D. DEROSE et J. WARREN : Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type. *ACM Transactions on Graphics*, 16(1):34–73, 1997. 22, 28, 37, 43, 44, 59
- [76] L. PIEGL et W. TILLER : *The NURBS book*. Springer-Verlag, London, UK, 1995. 22
- [77] D. LUEBKE, B. WATSON, J. D. COHEN, M. REDDY et A. VARSHNEY : *Level of Detail for 3D Graphics*. Elsevier Science Inc., 2002. 10
- [78] B. LÉVY, S. PETITJEAN, N. RAY et J. MAILLOT : Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation. In *SIGGRAPH '02 : Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 362–371. ACM Press, 2002. 39

- [79] J. MAILLOT, H. YAHIA et A. VERROUST : Interactive texture mapping. In *SIGGRAPH '93 : Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 27–34. ACM Press, 1993. 39
- [80] S. MALLAT : A theory for multiresolution signal decomposition : The wavelet representation. *IEEE Trans. Pat. Anal. Mach. Intell.*, 11:674–693, 1989. 20
- [81] S. MALLAT : *A Wavelet Tour of Signal Processing, 2nd edition*. Academic Press, 1999. 20, 41
- [82] A. P. MANGAN et R. T. WHITAKER : Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4):308–321, décembre 1999. 92
- [83] M. MARTINET : *Analyse multirésolution en ondelettes du rayonnement acoustique des structures planes*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, décembre 2001. 18
- [84] M. MEYER, M. DESBRUN, P. SCHRÖDER et A.H. BARR : Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds. In *Proceedings of Visualization and Mathematics*, 2002. 38
- [85] F. MORAN, P. GIOIA, M. STELIAROS, M. BOURGES-SEVENIER et N. GARCIA : Subdivision surfaces in MPEG-4. In *Proceedings of International Conference on Image Processing*, volume 3, pages III–5 – III–8, 2002. 23
- [86] M. X. NGUYEN, X. YUAN et B. CHEN : Geometry completion and detail generation by texture synthesis. *The Visual Computer (Special Issue for Pacific Graphics2005)*, 21(9–10):669–678, 2005. 154
- [87] ISO/IEC 14496-16. Coding of Audio-Visual Objects : Animation Framework extension (AFX) : décembre 2002. 23, 114
- [88] C. PARISOT, M. ANTONINI et M. BARLAUD : High performance coding using a model-based bit allocation with EBCOT. In *EUSIPCO, XI European Signal Processing Conference*, Toulouse, France, 3-6 septembre 2002. 155
- [89] S.-B. PARK, C.-S. KIM et S.-U. LEE : Error resilient 3-D mesh compression. *IEEE Transactions on Multimedia*, 8(5):885–895, octobre 2006. 156
- [90] F. PAYAN : *Optimisation du compromis débit-distorsion pour la compression géométrique de maillages surfaciques triangulaires*. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, décembre 2004. ix, 14, 30, 116, 128, 129, 155
- [91] F. PAYAN et M. ANTONINI : An efficient bit allocation for compressing normal meshes with an error-driven quantization. *Comput. Aided Geom. Des.*, 22(5):466–486, 2005. 53, 116, 128, 129, 149, 155
- [92] G. PEYRÉ et S. MALLAT : Surface compression with geometric bandelets. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):601–608, 2005. 41
- [93] E. PRAUN et H. HOPPE : Spherical parametrization and remeshing. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):340–349, 2003. 42
- [94] S. PULLA, A. RAZDAN et G. FARIN : Improved curvature estimation for watershed segmentation of 3-dimensional meshes. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, 2002, 2001. 92
- [95] N. RAY, W. CHIU LI, B. LEVY, A. SHEFFER et P. ALLIEZ : Periodic global parameterization. *ACM Transactions on Graphics*, 2006. 50, 93
- [96] A. RAZDAN et M. BAE : A hybrid approach to feature segmentation of triangle meshes. *Computer-Aided Design*, 35(9):783–789, 2003. 93



- [97] J. RISSANEN : Generalized kraft inequality and arithmetic coding. *IBM Journal of Research and Development*, 20(3):198–203, 1976. 31
- [98] J. ROSSIGNAC : Edgebreaker : Connectivity compression for triangle meshes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(1):47–61, 1999. 113, 128
- [99] C. ROUDET, F. DUPONT et A. BASKURT : Comparaison de schémas de décomposition en ondelettes pour un traitement local des maillages surfaciques triangulaires. In *COMpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*, novembre 2006. 59
- [100] C. ROUDET, F. DUPONT et A. BASKURT : Multiresolution mesh segmentation based on surface roughness and wavelet analysis. volume 6508, page 65082E. SPIE, 2007. 91
- [101] M. ROY, S. FOUFOU, A. KOSCHAN, F. TRUCHETET et M. ABIDI : Multiresolution analysis for irregular meshes with appearance attributes. In *Proceedings of IEEE ICIP'05*, volume 3, pages 816–819, 2005. 37
- [102] A. SAID et W. A. PEARLMAN : A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 6:243–250, 1996. xviii, 29
- [103] P. V. SANDER, J. SNYDER, S. J. GORTLER et H. HOPPE : Texture mapping progressive meshes. In Eugene FIUME, éditeur : *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 409–416. ACM Press / ACM SIGGRAPH, 2001. 39
- [104] P. V. SANDER, Z. J. WOOD, S. J. GORTLER, J. SNYDER et H. HOPPE : Multi-chart geometry images. In *SGP '03 : Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, pages 146–155. Eurographics Association, 2003. 42
- [105] B. SAUVAGE : *Déformation de courbes et surfaces multirésolution sous contraintes*. Thèse de doctorat, INP-Grenoble, décembre 2005. 26, 55, 56
- [106] P. SCHRÖDER et W. SWELDENS : Spherical wavelets : efficiently representing functions on the sphere. In *SIGGRAPH '95 : Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 161–172. ACM Press, 1995. 41
- [107] J. M. SHAPIRO : Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 41(12):3445–3462, 1993. 28
- [108] L. SHIUE, P. ALLIEZ, R. URSU et L. KETTNER : A tutorial on CGAL polyhedron for subdivision algorithms. In *2nd CGAL User Workshop*, 2004. <http://www.cgal.org/Tutorials/Polyhedron/>. 161, 162
- [109] J.-Y. SIM, C.-S. KIM, C.C.J. KUO et S.U. LEE : Normal mesh compression based on rate-distortion optimization. In *IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing*, pages 13–16, 2002. 53, 128, 129
- [110] J.-Y. SIM, C.-S. KIM, C.C.J. KUO et S.U. LEE : Rate-distortion optimized compression and view-dependent transmission of 3-D normal meshes. 15(7):854–868, juillet 2005. x, xiii, xvii, 42, 48, 49, 53, 115, 116, 121, 128, 129, 149, 155
- [111] O. SORKINE, D. COHEN-OR et S. TOLEDO : High-pass quantization for mesh encoding. In *Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing*, pages 42–51. Eurographics Association, 2003. 76, 156
- [112] O. SORKINE, D. IRONY et S. TOLEDO : Geometry-aware bases for shape approximation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(2):171–180, 2005. 16

- [113] J. STAM et C. T. LOOP : Quad/triangle subdivision. *Comput. Graph. Forum*, 22(1):79–86, 2003. 161
- [114] Y. SUN, D. PAGE et J. PAIK : Triangle mesh-based edge detection and its application to surface segmentation and adaptive surface smoothing. In *IEEE International Conference on Image Processing*, volume 3, pages 825–28, 2002. 92
- [115] W. SWELDENS : The lifting scheme : A new philosophy in biorthogonal wavelet constructions. In *Wavelet Applications in Signal and Image Processing III*, pages 68–79, 1995. 26, 57
- [116] W. SWELDENS : The lifting scheme : A construction of second generation wavelets. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 29(2):511–546, 1998. 26, 57, 59
- [117] G. TAUBIN : A signal processing approach to fair surface design. *Computer Graphics*, 29(Annual Conference Series):351–358, 1995. 35, 36, 86, 88, 135, 148
- [118] G. TAUBIN et J. ROSSIGNAC : Geometric compression through topological surgery. *ACM Trans. Graph.*, 17(2):84–115, 1998. 128
- [119] G. TAUBIN, T. ZHANG et G. H. GOLUB : Optimal surface smoothing as filter design. In *ECCV '96 : Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision-Volume I*, pages 283–292. Springer-Verlag, 1996. 35, 36, 135
- [120] D. S. TAUBMAN : High performance scalable image compression with EBCOT. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9(7):1158–1170, 2000. 29, 54
- [121] C. TOUMA et C. GOTSMAN : Triangle mesh compression. In *Graphics Interface*, pages 26–34, 1998. xviii, 76, 128
- [122] S. VALETTE : *Modèles de maillages déformables 2D et multirésolution surfaciques 3D sur une base d'ondelettes*. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2002. 37, 53
- [123] S. VALETTE, A. GOUAILLARD et R. PROST : Compression of 3D triangular meshes with progressive precision. *Comp Graph*, 28(1):35–42, 2004. 37
- [124] I. H. WITTEN, R. M. NEAL et J. G. CLEARY : Arithmetic coding for data compression. *Communications of the ACM*, 30(6):520–540, 1987. 31
- [125] Z. YAN, S. KUMAR et C. C. JAY KUO : Error-resilient coding of 3-D graphic models via adaptive mesh segmentation. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.*, 11(7):860–873, 2001. 156
- [126] J.-H. YANG, C.-S. KIM et S.-U. LEE : Semi-regular representation and progressive compression of 3-D dynamic mesh sequences. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(9):2531–2544, 2006. xvii, 48, 49, 60, 61
- [127] Y. ZHANG, J. PAIK, A. KOSCHAN et M. A. ABIDI : A simple and efficient algorithm for part decomposition of 3D triangulated models based on curvature analysis. In *Proceedings of the International Conference on Image Processing, III*, pages 273–276. 113
- [128] D. ZORIN, P. SCHRÖDER et W. SWELDENS : Interpolating subdivision for meshes of arbitrary topology. Rapport technique, 1996. 35
- [129] D. ZORIN, P. SCHRÖDER et W. SWELDENS : Interpolating subdivision for meshes with arbitrary topology. *Computer Graphics*, 30(Annual Conference Series):189–192, 1996. xi, xiii, 24, 25, 65, 67, 68, 139, 140, 141
- [130] D. ZORIN, P. SCHRÖDER et W. SWELDENS : Interactive multiresolution mesh editing. *Computer Graphics*, 31(Annual Conference Series):259–268, 1997. 43



---

# Publications

## Revue Internationale avec comité de lecture

C. Roudet, F. Dupont, A. Baskurt : Adapted Semi-Regular 3-D Mesh Coding Based on a Wavelet Segmentation. *IEEE Transactions on Multimedia*. Juin 2008. (soumis)

R. Chaine, P.-M. Gandoin, C. Roudet : Reconstruction Algorithms are a Suitable Basis for Mesh Connectivity Compression. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (T-ASE) 2007*.

## Conférences Internationales avec comité de lecture

R. Chaine, P.-M. Gandoin, C. Roudet : Mesh Connectivity Compression Using Convection Reconstruction. *Dans ACM Symposium on Solid and Physical Modeling (ACM SPM) 2007*. Juin 2007, ACM Siggraph ed. Beijing China. pp. 41-49.

C. Roudet, F. Dupont, A. Baskurt : Multiresolution mesh segmentation based on surface roughness and wavelet analysis. *Dans Proc. SPIE, Visual Communications and Image Processing (VCIP) 2007*. Janvier 2007, San Jose, California - USA.

## Conférences Nationales avec comité de lecture

C. Roudet, F. Dupont, A. Baskurt : Comparaison de schémas de décomposition en ondelettes pour un traitement local des maillages surfaciques triangulaires. *Dans Compression et Représentation des Signaux Audiovisuels (CORESA'06)*. 9-10 Novembre 2006, Caen, France.

## Journées nationales sans acte

C. Roudet, F. Dupont, A. Baskurt : Compression adaptative de maillages 3D à partir d'une segmentation basée sur les ondelettes de subdivision. *Journées "Informatique et Géométrie" (JIG'08)*. 4-5 Juin 2008, Dijon, France.

C. Roudet, F. Dupont, A. Baskurt : Analyse multirésolution adaptative pour la compression de maillages surfaciques triangulaires. *Ecole Analyse Multirésolution pour l'Image*. 20-22 Mars 2007, Lyon, France.

C. Roudet, F. Dupont, A. Baskurt : Analyse multirésolution adaptative pour la compression de maillages surfaciques triangulaires. *Journée Compression Géométrique du GdR ISIS*. 19 octobre 2006, Paris, France.

C. Roudet, F. Dupont, A. Baskurt : Comparaison de schémas de décomposition en ondelettes pour les maillages surfaciques triangulaires. *Journées "Informatique et Géométrie" (JIG'06)*. 1 et 2 juin 2006, Lyon, France.

## Rapports de contrat et internes

C. Roudet, F. Dupont, A. Baskurt : Adapted Semi-Regular 3-D Mesh Coding Based on a Wavelet Segmentation. *Rapport de recherche RR-LIRIS-2008-004, Soumis à IEEE Transactions on Multimedia*. LIRIS UMR 5205 CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, Janv. 2008.

URL : <https://liris.cnrs.fr/publis?id=3346>

C. Roudet, F. Dupont, A. Baskurt : Multiresolution mesh segmentation based on surface roughness and wavelet analysis. *Rapport de recherche RR-LIRIS-2006-018*. LIRIS UMR 5205 CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, Nov. 2006.

URL : <https://liris.cnrs.fr/publis?id=2597>

C. Roudet : Etat de l'art en compression de maillages surfaciques et bilan de l'acquis FT/LIRIS. *Rapport intermédiaire dans le cadre du projet CoSurf (Compression de Surfaces)*. LIRIS Lyon - France Télécom R&D Rennes, 17 octobre 2006.

C. Roudet, F. Dupont, A. Baskurt : Comparaison de schémas de décomposition en ondelettes pour un traitement local des maillages surfaciques triangulaires. *Rapport de recherche RR-LIRIS-2006-010*. LIRIS UMR 5205 CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, Juin 2006.

URL : <https://liris.cnrs.fr/publis/?id=2399>

## COMPRESSION ADAPTATIVE DE SURFACES PAR ONDELETTES GÉOMÉTRIQUES

**Résumé :** L'évolution de l'infographie et des techniques de numérisation a récemment ouvert la voie à une modélisation tridimensionnelle du monde qui nous entoure. Afin de s'adapter à l'hétérogénéité des ressources et médias manipulant ces objets 3D, des techniques basées sur l'analyse multirésolution sont généralement utilisées car elles fournissent une représentation "scalable" de ces modèles géométriques. C'est dans ce cadre de compression et de transmission progressive d'objets 3D (modélisées sous forme de maillages surfaciques) que se situe ce travail de thèse, réalisé dans le cadre du projet "CoSurf" (collaboration entre le laboratoire LIRIS et France Télécom R&D Rennes). Nous proposons ainsi une nouvelle méthode de compression hiérarchique s'appuyant sur une décomposition en ondelettes, outil d'analyse performant et robuste qui a fait ses preuves en termes de compression d'images et de vidéos. Notre méthode se démarque des techniques existantes, puisqu'elle s'appuie sur une segmentation préalable de la surface en régions d'amplitudes fréquentielles variables. Les partitions résultantes peuvent ainsi être traitées indépendamment durant les phases d'analyse multirésolution, de quantification et d'allocation binaire, de façon à s'adapter aux caractéristiques surfaciques locales des maillages et ainsi réduire les informations à coder. La contribution visuelle de chacune des partitions à l'ensemble de la surface est également un point important à considérer dans la phase d'optimisation des bits alloués à celles-ci, notamment pour des applications comme la transmission et la visualisation sélectives. D'autres applications telles que le tatouage, le filtrage ou le débruitage adaptatifs, l'indexation ou enfin la correction d'erreurs après transmission sur un canal bruité, pourraient bénéficier de ce concept générique que nous avons proposé.

**Mots clés :** Maillages surfaciques, ondelettes géométriques, analyse multirésolution, schéma lifting, compression progressive, segmentation, transmission sélective.

---

## ADAPTIVE SURFACE COMPRESSION WITH GEOMETRIC WAVELETS

**Abstract :** The recent advances in computer graphics and digitization allow access to an ever finer three-dimensional modelling of the world. The critical challenges with 3D models lie in their transmission and rendering, which must fit the heterogeneity of the end resources (network bandwidth, display terminals ...). In this context, this thesis investigates the progressive compression and transmission of 3D models, based on multiresolution analysis, to provide a scalable representation of these geometric models. This work is part of "CoSurf", a collaborative research project involving LIRIS laboratory and France Télécom R&D in Rennes. The proposed hierarchical compression method is based on a wavelet decomposition, which is a robust and competitive analysis tool incorporated in the JPEG2000 and MPEG4 standards. The innovation, compared to existing techniques, lies in a prior surface segmentation in regions, each having a different frequency amplitude. Hence, it is possible to treat independently each resulting partition during the wavelet decomposition, quantization and binary allocation. The advantage is to fit the local features of the mesh surface, which can reduce the overall encoding information. It is finally important to consider each patch visual contribution to the entire surface, to optimize the bit allocation, essential for view-dependent transmission and visualization. Other applications like adaptive watermarking, filtering or denoising, indexing or error-resilient coding may benefit from this generic concept we proposed.

**Keywords :** Meshes, geometric wavelets, multiresolution analysis, lifting scheme, progressive compression, 3-D mesh partitioning, view-dependent transmission.