



Numéro d'ordre : 104-2011

Année 2011

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1
LABORATOIRE D'INFORMATIQUE EN IMAGE ET SYSTÈMES D'INFORMATION
ÉCOLE DOCTORALE INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES DE LYON

THÈSE DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Présentée en vue d'obtenir le grade de Docteur,
spécialité Informatique

par

Ho LEE

COMPRESSION PROGRESSIVE ET TATOUAGE CONJOINT DE MAILLAGES SURFACIQUES AVEC ATTRIBUTS DE COULEUR

Thèse soutenue le 21 juin 2011 devant le jury composé de :

M.	William Puech	Professeur à l'université Montpellier II	Rapporteur
M.	Marc Antonini	Directeur de Recherche CNRS, Sophia Antipolis	Rapporteur
M.	Rémy Prost	Professeur à l'INSA Lyon	Examineur
Mme.	Christine Guillemot	Directeur de Recherche INRIA, IRISA Rennes	Examineur
M.	Florent Dupont	Professeur à l'UCB Lyon 1	Directeur
M.	Guillaume Lavoué	Maître de Conférences à l'INSA Lyon	Co-encadrant

Laboratoire d'Informatique en Image et Systèmes d'information
UMR 5205 CNRS - Lyon 1 - Bât. Nautibus
69622 Villeurbanne cedex - France

A mes parents et à ma soeur

Remerciements

Tout d’abord, je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à mes directeurs de thèse, Florent Dupont et Guillaume Lavoué pour leur encadrement, leurs conseils et leur soutien qu’ils ont su m’accorder pendant ces trois dernières années. Leur expérience et leur compétence ont permis d’accomplir les principaux objectifs de cette thèse et m’ont permis de connaître la joie de la recherche. Quelques mots écrits ici ne seraient jamais suffisants pour les remercier.

Je tiens à remercier ensuite William Puech et Marc Antonini pour avoir accepté d’être mes rapporteurs et pour leurs précieuses suggestions et remarques qui ont permis d’améliorer la qualité de ce manuscrit.

Je voudrais également remercier Rémy Prost et Christine Guillemot pour avoir accepté de participer au jury de soutenance en tant que examinateurs.

Merci à tous les membres de l’équipe M2DisCo pour les discussions à la fois amicales et scientifiques. Plus particulièrement, je tiens à remercier Kai Wang pour son aide lorsque je me lançais sur le tatouage, et Cagatay Dikici pour ses nombreuses et précieuses remarques pendant notre collaboration. Je n’oublierais pas bien sûr de remercier ma co-bureau Haitang Feng pour m’avoir supporté pendant deux longues années. Ses encouragements occupent sans doute une partie importante de la réussite de cette thèse. Un merci à Sanghyun Seo pour ses différents conseils et pour avoir aidé à la recherche d’emploi. Je remercie également les autres membres du LIRIS que j’ai eu la chance de faire connaissance pour leur encouragement.

Je souhaite également remercier mes amis en dehors de LIRIS, notamment Euijong Kim, Seonghun Kim et Jegang Yon, pour avoir partagé les bons moments et pour m’avoir encouragé dans les moments difficiles.

Enfin je tiens à remercier toute ma famille et plus particulièrement mes parents qui m’ont toujours soutenu et ont cru en moi pendant tout mon séjour en France.

Résumé

L'utilisation des modèles 3D, représentés sous forme de maillage, est sans cesse croissante dans de nombreuses applications. Pour une transmission efficace et pour une adaptation à l'hétérogénéité des ressources de ces modèles, des techniques de compression progressive sont généralement utilisées. Afin de protéger le droit d'auteur de ces modèles pendant la transmission, des techniques de tatouage sont également employées. Dans ces travaux de thèse, nous proposons premièrement deux méthodes de compression progressive pour des maillages avec ou sans information de couleurs et nous présentons finalement un système conjoint de compression progressive et de tatouage.

Dans une première partie, nous proposons une méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion pour des maillages sans attribut de couleur. Pendant le processus de l'encodage, nous adoptons la précision de quantification au nombre d'éléments et à la complexité géométrique pour chaque niveau de détail. Cette adaptation peut s'effectuer de manière optimale en mesurant la distance par rapport au maillage original, ou de façon quasi-optimale en utilisant un modèle théorique pour une optimisation rapide. Les résultats montrent que notre méthode donne des résultats compétitifs par rapport aux méthodes de l'état de l'art.

Dans une deuxième partie, nous nous focalisons sur l'optimisation du compromis débit-distorsion pour des maillages possédant l'information de couleur attachée aux sommets. Après avoir proposé deux méthodes de compression pour ce type de maillage, nous présentons une méthode d'optimisation du débit-distorsion qui repose sur l'adaptation de la précision de quantification de la géométrie et de la couleur pour chaque maillage intermédiaire. Cette adaptation peut être effectuée rapidement selon un modèle théorique qui permet d'évaluer le nombre de bits de quantification nécessaire pour chaque maillage intermédiaire. Une métrique est également proposée pour préserver les éléments caractéristiques durant la phase de simplification.

Finalement, nous proposons un schéma conjoint de compression progressive et de tatouage. Afin de protéger tous les niveaux de détails, nous insérons le tatouage dans chaque étape du processus d'encodage. Pour cela, à chaque itération de la simplification, nous séparons les sommets du maillage en deux ensembles et nous calculons un histogramme de distribution de normes pour chacun d'entre eux. Ensuite, nous divisons ces histogrammes en plusieurs classes et nous modifions ces histogrammes en décalant les classes pour insérer un bit. Cette technique de tatouage est réversible et permet de

restaurer de manière exacte le maillage original en éliminant la déformation induite par l'insertion du tatouage. Nous proposons également une nouvelle méthode de prédiction de la géométrie afin de réduire le surcoût provoqué par l'insertion du tatouage. Les résultats expérimentaux montrent que notre méthode est robuste à diverses attaques géométriques tout en maintenant un bon taux de compression.

Mots Clés : Maillages surfaciques, compression progressive, attributs couleur, optimisation du compromis débit-distorsion, adaptation de quantification, compression et tatouage conjoint.

Abstract

The use of 3D models, represented as a mesh, is growing in many applications. For efficient transmission and adaptation of these models to the heterogeneity of client devices, progressive compression techniques are generally used. To protect the copyright during the transmission, watermarking techniques are also used. In this thesis, we first propose two progressive compression methods for meshes with or without color information, and we present a joint system of compression and watermarking.

In the first part, we propose a method for optimizing the rate-distortion trade-off for meshes without color attribute. During the encoding process, we adopt the quantization precision to the number of elements and geometric complexity. This adaptation can be performed optimally by measuring the distance regarding the original mesh, or can be carried out using a theoretical model for fast optimization. The results show that our method yields competitive results with the state-of-the-art methods.

In the second part, we focus on optimizing the rate-distortion performance for meshes with color information attached to mesh vertices. We propose firstly two methods of compression for this type of mesh and then we present a method for optimizing the rate-distortion trade-off based on the adaptation of the quantification precision of both geometry and color for each intermediate mesh. This adaptation can be performed rapidly by a theoretical model that evaluates the required number of quantization bits for each intermediate mesh. A metric is also proposed in order to preserve the feature elements throughout simplification.

Finally, we propose a joint scheme of progressive compression and watermarking. To protect all levels of detail, we insert the watermark within each step of the encoding process. More precisely, at each iteration of simplification, we separate vertices into two sets and compute a histogram of distribution of vertex norms for each set. Then, we divide these histograms into several bins and we modify these histograms by shifting bins to insert a bit. This watermarking technique is reversible and can restore exactly the original mesh by eliminating the distortion caused by the insertion of the watermark. We also propose a new prediction method for geometry encoding to reduce the overhead caused by the insertion of the watermark. Experimental results show that our method is robust to various geometric attacks while maintaining a good compression ratio.

Keywords : 3D mesh, progressive compression, color attribute, rate-distortion trade-off optimization, quantization adaptation, joint compression and watermarking.

Table des matières

Remerciements	v
Résumé	vii
Abstract	ix
Table des matières	xi
Table des figures	xv
Liste des Tableaux	xxi
1 Introduction	1
2 Compression progressive de maillages sans attributs couleur	9
2.1 Etat de l'art	10
2.1.1 Approches mono-résolution	10
2.1.2 Approches progressives	15
2.1.2.1 Approches guidées par la connectivité	15
2.1.2.2 Approches guidées par la géométrie	18
2.1.2.3 Allocation binaire	21
2.2 Algorithme de base	22
2.3 Codeur géométrique	25
2.3.1 Rotation bijective en 2D	28
2.3.2 Rotation bijective en 3D et la minimisation de l'angle de rotation	29
2.4 Optimisation du compromis débit-distorsion	36
2.4.1 Changement de la précision de quantification	39
2.4.2 Détermination optimale de la précision de quantification	40
2.4.3 Détermination quasi-optimale de la précision de quantification	42
2.5 Résultats expérimentaux	45
2.5.1 Taux de compression sans perte	45
2.5.2 Performance débit-distorsion	46
2.5.3 Robustesse de la méthode quasi-optimale	47

2.5.4	Temps de traitement	51
2.6	Conclusion	54
3	Compression progressive de maillages avec attributs couleur	57
3.1	Etat de l'art	58
3.1.1	Approches mono-résolution	58
3.1.2	Approches progressives	60
3.2	Méthodes de compression	62
3.2.1	Espace de couleur	62
3.2.2	Méthode basée sur la prédiction	62
3.2.3	Méthode basée sur la table de correspondance	64
3.3	Métrique pour la compression progressive dirigée par la couleur	66
3.4	Optimisation du compromis débit-distorsion	71
3.4.1	Changement de la précision de quantification de la couleur	73
3.4.2	Détermination optimale de la prochaine opération	74
3.4.3	Détermination rapide et quasi-optimale de la prochaine opération	77
3.4.3.1	Estimation de la précision de quantification de la géométrie	77
3.4.3.2	Estimation de la précision de quantification de la couleur	78
3.5	Résultats expérimentaux	82
3.5.1	Taux de compression de la couleur	82
3.5.2	Performance débit-distorsion	84
3.5.3	Temps de traitement	87
3.6	Conclusion	87
4	Compression progressive conjointe au tatouage réversible	91
4.1	Introduction	92
4.2	Etat de l'art	94
4.2.1	Méthodes de tatouage robuste	94
4.2.2	Méthodes de tatouage réversible	95
4.2.3	Méthodes conjointes de compression et tatouage	97
4.3	Méthode conjointe de compression progressive et tatouage	99
4.3.1	Sélection de la primitive de tatouage	99
4.3.2	Insertion du tatouage	100
4.3.3	Extraction du tatouage	104
4.3.4	Traitement du cas particulier	105
4.3.5	Réversibilité complète et nouvelle méthode de prédiction pour la géométrie	105
4.3.6	Augmentation de la capacité de tatouage	109
4.4	Résultats expérimentaux	112
4.4.1	Evaluation du taux de compression, de la distorsion et de la capacité	113
4.4.2	Evaluation de la robustesse	115
4.4.2.1	Robustesse contre le bruit du canal	115
4.4.2.2	Robustesse contre les attaques intentionnelles	117

4.5	Conclusion	120
5	Conclusion générale	125
5.1	Contributions	125
5.2	Perspectives	127
	Bibliographie	129
	Publications de l’auteur	137

Table des figures

1.1	Cadre applicatif du projet COLLAVIZ.	3
1.2	Organisation du projet COLLAVIZ.	4
1.3	Un prototype du sous-projet Client. L'utilisateur peut visualiser les objets 3D et peut marquer un point d'intérêt avec un drapeau sur ces objets pour faciliter une collaboration.	5
1.4	Un prototype du sous-projet Collaboration. La détection de collision est développée pour attacher de manière appropriée des annotations sur les objets 3D.	5
2.1	Prédiction linéaire (à gauche) et prédiction par la règle du parallélogramme (à droite). On code le vecteur différence Δ entre la position du sommet courant V_i et la position prédite $V_{prédite}$	13
2.2	La contraction d'arête.	16
2.3	La suppression de sommet.	17
2.4	Le codage de la géométrie par décomposition en kd-tree. Image tirée de [GD02].	19
2.5	Un exemple de l'étape de décimation appliquée sur un maillage régulier.	24
2.6	Un exemple de l'étape de nettoyage. Pour un maillage régulier, le maillage résultant des étapes de décimation et de nettoyage est aussi régulier.	24
2.7	Un maillage régulier (a) est simplifié par la conquête de décimation (b) et ensuite par la conquête de nettoyage (c) dans l'algorithme d'Alliez et Desbrun [AD01a]. Le maillage résultant a aussi une structure régulière.	25
2.8	Méthode de codage de la géométrie de l'algorithme [AD01a]. Image tirée de [AD01a].	26
2.9	Un exemple en 2D de la perte géométrique causée par l'opération d'arrondi des coordonnées de Frenet. La position du sommet V_r est représentée dans le repère de Frenet. La position initiale de ce sommet ne peut pas être restaurée de manière exacte lors de la décompression.	27
2.10	La rotation dans l'espace 3D peut être décrite par 3 rotations.	29
2.11	Méthode de minimisation de l'angle ψ	31

2.12	Comparaison de distorsion du modèle "Rabbit" sous différentes précisions de quantification et à différents niveaux de résolutions. $\#S$, Q et D désignent respectivement le nombre de sommets, les bits de quantification et l'erreur géométrique.	38
2.13	Notre algorithme (flèche rouge) réduit la précision de quantification au cours de l'encodage contrairement aux méthodes classiques.	39
2.14	Pendant l'encodage, les cellules-filles (a) sont fusionnées pour former une cellule-mère (b). Le sommet est déplacé au centre et l'indice de la cellule-fille est codé.	40
2.15	L'histogramme des indices des cellules-filles avant (a) et après (b) la réorganisation des indices par le calcul de la priorité.	40
2.16	Choix de la meilleure opération à effectuer : décimation ou diminution de précision de quantification.	41
2.17	Résultats du modèle "Horse" obtenus par différentes approches à des débits similaires : Alliez et Desbrun (AD 2001) [AD01a], Peng et Kuo (PK 2005) [PK05] et notre algorithme.	42
2.18	Les chemins parcourus en utilisant des nombres de bits différents de quantification sur le modèle "Bimba".	44
2.19	Précision optimale de quantification en fonction de K_G obtenu sur des niveaux intermédiaires des différents modèles.	45
2.20	Courbe débit-distorsion de Venusbody.	48
2.21	Courbe débit-distorsion de Venushead.	48
2.22	Courbe débit-distorsion de Rabbit.	49
2.23	Courbe débit-distorsion de Horse.	49
2.24	Courbe débit-distorsion de Bimba.	50
2.25	Courbe débit-distorsion de David head.	50
2.26	Courbe débit-distorsion de Dinosaur. Les coefficients de la méthode quasi-optimale sont modifiés.	52
2.27	Courbe débit-distorsion de Mannequin. Les coefficients de la méthode quasi-optimale sont modifiés.	52
2.28	Courbe débit-distorsion de Bimba. Le résultat de la méthode quasi-optimale est obtenu en utilisant des nouveaux coefficients issus de la deuxième base.	53
2.29	Courbe débit-distorsion de Horse. Le résultat de la méthode quasi-optimale est obtenu en utilisant des nouveaux coefficients issus de la deuxième base.	53
3.1	Méthode de prédiction pour le codage de la couleur dans le travail de Yoon et al. [YKH06].	59
3.2	Un sommet v est enlevé (resp. inséré) pendant le processus d'encodage (resp. décodage). Sa position est prédite à partir de la position moyenne des sommets voisins b	62
3.3	La couleur du sommet à enlever (au milieu) est prédite à partir des couleurs des sommets voisins. Notre méthode considère la discontinuité de la couleur afin de réduire le coût de compression.	63

3.4	Diagramme du processus d'encodage de notre méthode basée sur la table de couleur.	65
3.5	Réduction du nombre de couleurs basée sur un algorithme de clustering pour le modèle "Globe".	67
3.6	Un exemple de décodage progressif de la table de couleur. La table courante (a) s'agrandit quand une nouvelle couleur, C_2 , apparaît (b).	68
3.7	E_C est calculée en mesurant la différence entre la couleur du sommet courant (couleur noire) et la couleur estimée après la suppression et la re-triangulation (couleur grise). Cette couleur estimée est obtenue en appliquant l'interpolation sur les couleurs des trois sommets du triangle central du patch après la re-triangulation.	69
3.8	Le maillage original du modèle "GIST-Monkey" (à gauche) et le maillage simplifié du même modèle (à droite) en utilisant notre métrique basée sur l'erreur de la couleur E_C uniquement. On constate que la couleur est bien préservée, mais la géométrie n'est pas conservée correctement.	70
3.9	Le maillage original du modèle "GIST-Monkey" (a) et les maillages simplifiés du même modèle en utilisant notre métrique basée sur l'erreur de la couleur E_C et l'erreur de la géométrie E_G . Pour chaque niveau de résolution, le niveau de préservation de la couleur est adapté.	72
3.10	Le maillage original (à gauche) et les maillages intermédiaires avec (au centre) et sans (à droite) l'utilisation de la métrique pour le modèle "Globe". La métrique proposée permet de préserver les éléments caractéristiques de la couleur pendant la simplification.	73
3.11	Schémas du codage de la diminution de la précision de quantification de la couleur. L'utilisation d'un codeur commun pour toutes les couleurs (a) est moins efficace que l'utilisation d'un codeur pour chaque couleur (b).	75
3.12	Le coût du codage du changement de la précision de quantification de la couleur (en bps) en fonction du niveau de détail pour le modèle "GIST-Monkey" et pour le modèle "Radiateur". L'utilisation de codeurs multiples (un codeur par couleur) est plus efficace que l'utilisation d'un codeur commun.	76
3.13	Précisions optimales de quantification en fonction de K_G	78
3.14	Précision de quantification initiale de la couleur en fonction de K_{C1} pour différents modèles.	80
3.15	Précision de quantification finale de la couleur en fonction de K_{C1} des différents modèles.	80
3.16	Précision de quantification de la couleur en fonction de la valeur moyenne de K_{C2}	81
3.17	Modèles testés.	83
3.18	Courbe débit-distorsion du modèle "Radiateur".	85
3.19	Courbe débit-distorsion du modèle "Enveloppe".	85
3.20	Courbe débit-distorsion du modèle "GIST-Monkey".	86
3.21	Courbe débit-distorsion du modèle "Nefertiti".	86

3.22	Comparaison des modèles intermédiaires pour des débits similaires entre notre méthode optimale et notre méthode initiale (sans adaptation de quantification et sans métrique).	89
4.1	Un exemple de raffinement progressif et d'extraction du tatouage.	93
4.2	Une étape de simplification du maillage. Un maillage (a) est simplifié par la première conquête (b) et la deuxième conquête. Les sommets enlevés (bleu) forment l'ensemble E_1 et les autres sommets forment l'ensemble E_2	100
4.3	Histogrammes des normes des sommets de deux ensembles E_1 et E_2 , pour le niveau le plus fin (a : H_1 du niveau n , b : H_2 du niveau n) et pour le niveau après 7 itérations (c : H_1 du niveau $n - 7$, d : H_2 du niveau $n - 7$) du modèle "Rabbit".	102
4.4	La valeur du centre de masse CM_1 est modifiée pour insérer un bit. La modification est effectuée en déplaçant les classes de l'histogramme H_1 . Dans cet exemple, nous fixons $F = 1$	103
4.5	Une étape de raffinement du maillage et l'extraction du tatouage. Un maillage intermédiaire (a) est raffiné (b). Après l'extraction, la distorsion induite par l'insertion est supprimée (c).	105
4.6	Lorsque la distance d entre le centre de gravité du maillage v_c et le sommet le plus proche n'est pas suffisante ($d < F$) pour générer les classes vides (à gauche), nous déplaçons le centre de gravité à une autre position permettant de créer les classes (à droite).	106
4.7	Un exemple de violation de la réversibilité. Le sommet initial v_i est déplacé à la position tatouée et quantifiée v_w au cours de l'insertion. A l'extraction, v_w est déplacé dans une direction opposée, légèrement différente dû à la deuxième quantification. La position extraite v_e est différente que la position initiale v_i	107
4.8	Les maillages obtenus à la fin de la reconstruction : Bimba, David head, Fandisk et Foot. Les sommets qui ont violé la réversibilité sont colorés en rouge (ligne du bas). #S et #E désignent respectivement le nombre de sommets du maillage original et le nombre de sommets erronés (qui n'ont pas retrouvé la position initiale). Ici, nous fixons $F = 2$ et $K = 256$	108
4.9	La méthode originale de prédiction (à gauche) ne permet pas un codage efficace pour notre système conjoint (à droite). La méthode de prédiction proposée prend en compte le déplacement du sommet à coder (v'_2) pour réduire de façon efficace le surcoût dû au changement de la géométrie.	108
4.10	La décomposition du maillage de base. Ici, nous fixons $R = 2$	110
4.11	La décomposition du modèle "Horse" dans les différents niveaux de détails $n - 8$ (a), $n - 4$ (b) et n (c). Les régions sont illustrées avec des couleurs distinctes.	111
4.12	La décomposition du modèle "Bunny" dans les différents niveaux de détails $n - 4$ (a), $n - 2$ (b) et n (c). Dans cette figure, la région est divisée lorsque le nombre de ses sommets est supérieur à $N_{division} = 500$	111

4.13	Les maillages originaux : (a) Horse, (b) Bunny, (c) Dragon and (d) Venus.	112
4.14	Les maillages reconstruits : (a) Horse, (b) Bunny, (c) Dragon and (d) Venus. Ici, nous fixons $F = 6$.	112
4.15	Une étape d'insertion de sommets et de correction de la géométrie. Nous insérons un ensemble de sommets au maillage intermédiaire (niveau $n - 4$) du modèle "Horse" (a) pour obtenir un niveau de détail plus élevé (b). Lors de l'extraction du tatouage, la déformation induite par l'insertion du tatouage est supprimée (c). Dans cette figure, nous fixons $F = 6$.	113
4.16	Capacité du tatouage en fonction du nombre initial de régions. Le nombre initial de régions est préservé au cours de la transmission progressive dans (a) et des grandes régions sont divisées dans (b) avec un seuil $N_{division} = 500$.	115
4.17	Les maillages reconstruits sans l'extraction du tatouage et la correction de la géométrie : (a) Venus, (b) Bunny, (c) Dragon.	116
4.18	Le modèle "Dragon" attaqué par l'addition du bruit aléatoire avec une amplitude de 0,5%. A chaque itération, seuls les sommets nouvellement insérés sont modifiés : (a) Original, (b) Niveau n-6 (3 486 sommets), (c) Niveau n-3 (13 433 sommets), (d) Niveau n (50 000 sommets).	118
4.19	Le modèle "Bunny" attaqué par l'addition du bruit aléatoire avec une amplitude de 0,5% : (a) Original, (b) Niveau n-6 (2 273 sommets) après 6 attaques, (c) Niveau n-3 (8 664 sommets) après 9 attaques, (d) Niveau n (34 835 sommets) après 12 attaques.	121
4.20	Le modèle "Horse" attaqué par le lissage Laplacien avec 30 itérations et un facteur de déformation $\lambda = 0,03$: (a) Original, (b) Niveau n-6 (1 348 sommets) après 5 attaques, (c) Niveau n-3 (5 267 sommets) après 8 attaques, (d) Niveau n (19 851 sommets) après 11 attaques.	122
4.21	Le modèle "Venus" attaqué par la quantification uniforme de 7-bit des sommets : (a) Original, (b) Niveau n-6 (7 054 sommets) après 9 attaques, (c) Niveau n-3 (27 178 sommets) après 12 attaques, (d) Niveau n (100 759 sommets) après 15 attaques.	123

Liste des tableaux

2.1	Comparaison du taux de compression de la géométrie. Chiffres sont en bps (bits par sommet).	36
2.2	Comparaison du taux de compression. Chiffres en bps (bits par sommet).	46
2.3	Comparaison du temps d'exécution de l'encodage entre notre approche et l'algorithme d'Alliez et Desbrun (AD 2001) [AD01a] en secondes. . . .	54
2.4	Comparaison du temps d'exécution du décodage entre notre approche et l'algorithme d'Alliez et Desbrun (AD 2001) [AD01a] en secondes.	54
3.1	Comparaison du taux de compression sans pertes. Les chiffres sont en bps (bits par sommet).	84
3.2	Comparaison du temps d'exécution de l'encodage en secondes.	87
3.3	Comparaison du temps d'exécution du décodage en secondes.	88
4.1	Taux de compression de notre méthode de compression sans l'adaptation de quantification, notre méthode avec la quasi-réversibilité et avec la réversibilité complète. La distorsion, le temps de traitement et la capacité sont également listés.	114
4.2	Robustesse contre le bruit du canal, qui est simulé par une attaque d'addition de bruit aléatoire sur chaque sommet inséré.	116
4.3	Robustesse contre l'addition de bruit aléatoire avec une amplitude de 0,5 %.	117
4.4	Robustesse contre le lissage Laplacien avec 30 itérations et un facteur de déformation $\lambda = 0,03$. Pour le modèle "Dragon" 50 itérations sont utilisées.	117
4.5	Robustesse contre une quantification uniforme de 7 bits des sommets. . .	119

Introduction

De nos jours, les modèles géométriques tridimensionnels (3D) sont de plus en plus utilisés dans de nombreux domaines incluant la conception assistée par ordinateur (CAO), la simulation scientifique, la réalité augmentée, les visites virtuelles, la médecine, les jeux vidéos ou le cinéma, notamment grâce à l'augmentation de la performance des ordinateurs (capacité de calcul, de mémoire et graphique) et aux avancées des réseaux internet. Ces modèles 3D sont généralement représentés sous forme de maillages surfaciques en raison de leur efficacité et de leur simplicité. Un maillage surfacique est composé de faces planes, le plus souvent triangulaires, constituant une approximation par une surface linéaire par morceaux d'un objet 3D réel.

Typiquement, un maillage est composé d'une information de *géométrie* (coordonnées des sommets dans l'espace euclidien) et d'une information de *connectivité* (définissant la manière dont les sommets sont reliés entre eux). L'information de connectivité est nécessaire à cause de l'échantillonnage intrinsèquement irrégulier d'un maillage (les sommets n'ont généralement pas le même nombre de voisins), contrairement aux autres données numériques comme les images 2D. Bien que l'ensemble de ces informations constitue un outil puissant pour représenter et modéliser des objets 3D, même très complexes, il représente également une quantité importante de données à conserver pour une modélisation fine et détaillée. Cette représentation précise est rendue possible grâce aux dernières avancées des techniques d'acquisition, de stockage et de rendu, qui ont permis d'augmenter considérablement la complexité de ces modèles. Cette augmentation de la complexité a introduit par la suite un besoin de compression pour stocker, échanger ou encore manipuler plus aisément ces objets.

En fonction des applications visées, l'utilisateur peut choisir d'utiliser soit une méthode de compression avec pertes, soit une méthode de compression sans perte ; gé-

néralement les méthodes de compression avec pertes permettent d'obtenir des taux de compression élevés en autorisant des pertes d'information. Ces méthodes ne sont pourtant pas adaptées à certaines applications en imagerie médicale ou militaire par exemple, pour lesquelles une perte d'information n'est pas tolérée. Dans ce contexte, l'utilisation des méthodes de compression sans perte permettant de reconstruire de manière exacte le maillage original est préférable.

La réduction maximale de la taille du fichier compressé n'est pas le seul objectif visé dans le domaine de la compression de maillages 3D. En effet, l'explosion de la complexité géométrique des maillages et le développement relativement lent des réseaux ont conduit à l'apparition des méthodes de représentation et de compression *progressive*. Un avantage de ces méthodes est la possibilité de transmission progressive du modèle, cette caractéristique étant particulièrement utile pour manipuler des modèles complexes et volumineux ; une version grossière peut être visualisée rapidement au décodage avec un coût très faible et cet objet peut être raffiné successivement avec des données supplémentaires reçues jusqu'à ce que le modèle original soit reconstruit. Un autre avantage remarquable de ces méthodes est qu'elles permettent l'adaptation du transfert de ces modèles aux diverses ressources du client (débit de réseaux, capacité de visualisation du terminal). Lorsque la qualité de l'objet courant est satisfaisante pour son application visée ou si la manipulation ou le rendu de l'objet après une étape de raffinement risque de dépasser la capacité graphique du terminal, l'utilisateur peut alors interrompre à tout moment la transmission.

Le projet COLLAVIZ (Open Source Platform for remote collaborative multi-domain pre/post-processing) financé par l'Agence Nationale pour la Recherche française (ANR) est directement lié à ces problématiques. Les partenaires de ce projet sont de types académiques (LIRIS, ECP, EGID, INPT, INSA de Rennes, SCILAB) et de types industriels (ARTENUM, BRGM, DISTENE, EDF, FAURECIA, MEDIT, MCLP Consulting, NECS, OXALYA, TECHVIZ, TERATEC). Il existe également les partenaires associés (AGCO, CEA/DIF, IFP, Institut de Physique du Globe de Paris, Université Paris 6 - UMR SISYPHE, Institut de Recherche pour le Développement from New Caledonia, Colorado School of Mines, Web3D consortium, Kitware, CEI, University of Cardiff).

L'objectif principal de ce projet est de concevoir une plate-forme Open Source modulaire pour la visualisation 3D collaborative et distante de données scientifiques de grande taille. Le cadre applicatif est détaillé et illustré dans la figure 1.1. Premièrement, une simulation scientifique est effectuée sur un cluster disposant d'une grande capacité de calcul. A la fin de la simulation, les chercheurs consultent à distance les résultats de leur calcul, souvent représentés sous forme de maillages triangulaires. La taille de ces

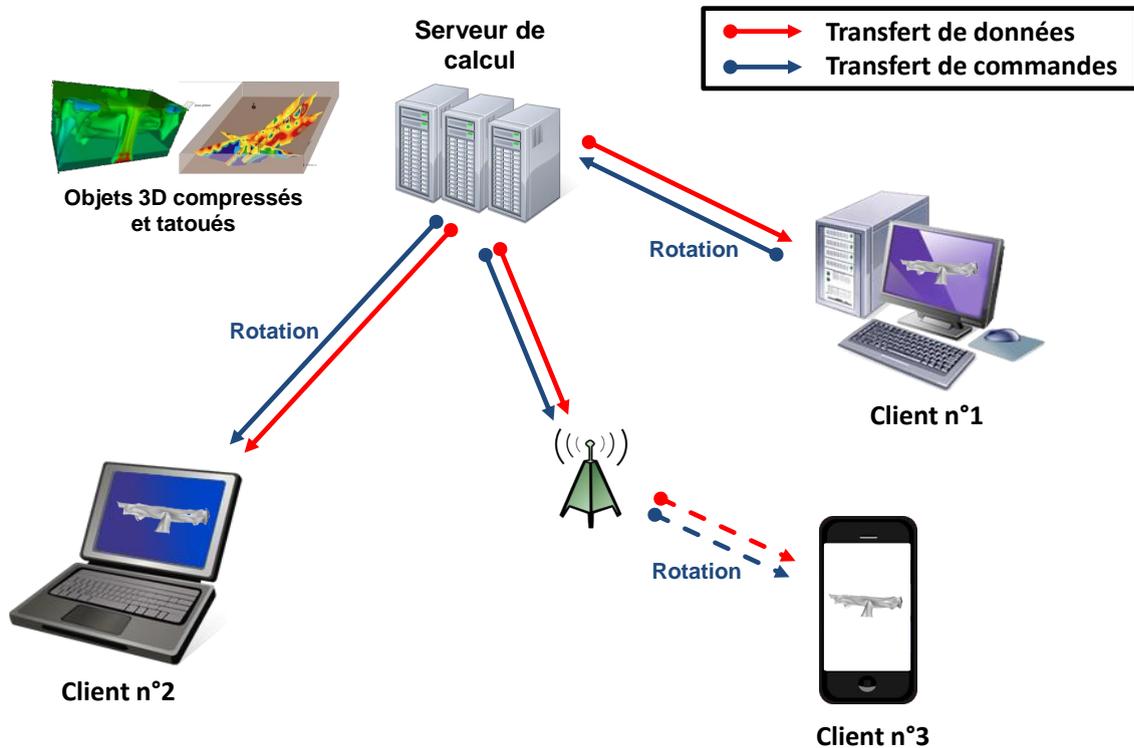


FIGURE 1.1 – Cadre applicatif du projet COLLAVIZ.

maillages est en général très importante (le nombre de triangles peut atteindre un million), une compression efficace est donc requise. Un des objectifs est d'aider les experts à collaborer autour de l'analyse de ces données scientifiques en leur permettant de partager les outils, l'annotation et le point de vue, par exemple. Un exemple de partage de point de vue est illustré dans la figure 1.1. Lorsque le client n°1 applique une rotation sur l'objet en observation, l'information relative à cette rotation est transmise aux autres clients afin de visualiser l'objet avec le même point de vue.

Le projet COLLAVIZ est décomposé en 8 sous-projets. La figure 1.2 illustre cette décomposition et les responsables de chaque sous-projet. Parmi ces sous-projets, les sous-projets Client (architecture et développement du client) et Remote Collaboration (synchronisation entre les clients et développement des outils pour la collaboration) sont étroitement liés à ce travail de thèse. Les figures 1.3 et 1.4 illustrent quelques solutions proposées dans le cadre de ces sous-projets.

Notre travail de thèse s'inscrit dans le contexte du sous-projet Compression. L'objectif est de proposer une méthode pour une transmission efficace et sécurisée des objets 3D à travers des réseaux bas débit et de manière adaptative aux différents terminaux des

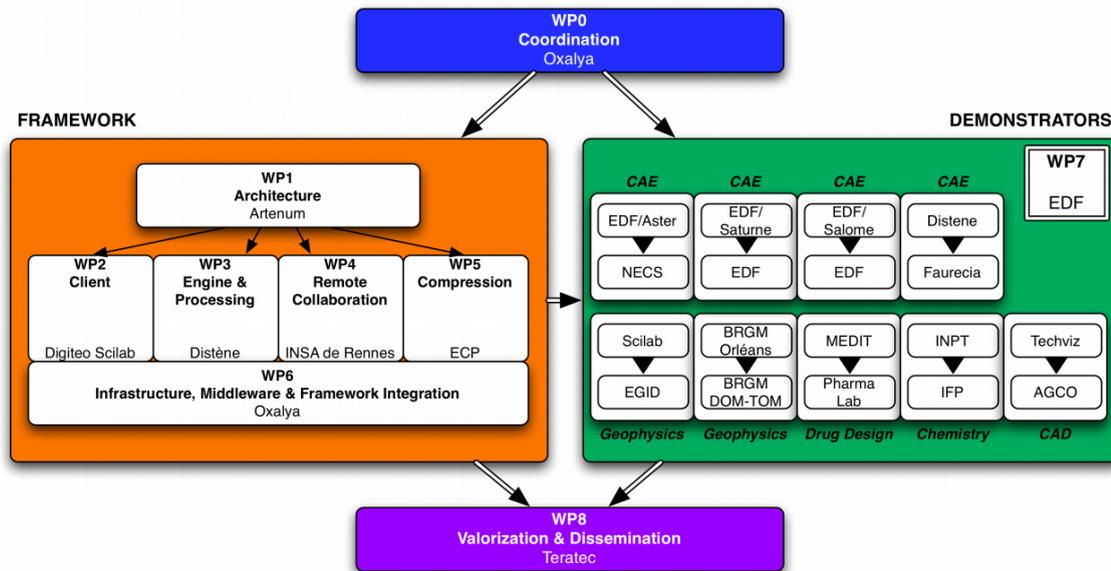


FIGURE 1.2 – Organisation du projet COLLAVIZ.

clients. Les objets à transmettre dans ce projet sont modélisés sous forme de maillages triangulaires. Il est important de noter que ces maillages possèdent souvent des données supplémentaires (couleur) attachées aux sommets.

Pour réaliser une transmission efficace, nous avons développé une méthode de compression progressive quasi sans perte, en tolérant uniquement l'erreur de la quantification. Cette méthode permet de transmettre un modèle sous différents niveaux de résolutions en fonction de la taille des données transmises. Elle permet donc d'adapter ces modèles aux différentes ressources du client. L'enjeu principal des méthodes progressives est d'optimiser la qualité visuelle du maillage reconstruit pour une quantité d'information reçue. C'est pourquoi nous abordons cette problématique de la transmission efficace du point de vue de l'optimisation du compromis débit-distorsion. Dans un premier temps, nous nous intéressons aux maillages qui ne comportent pas d'information de couleur. La raison en est que ce type de maillage est utilisé dans de nombreuses applications. En outre, la plupart des algorithmes de compression progressive ne considèrent pas jusqu'à présent les maillages avec des attributs.

De manière générale, une quantification initiale et à précision fixe est appliquée aux sommets du maillage. Bien que cette quantification soit fortement liée à la fois au débit et à la distorsion, l'adaptation de cette quantification pour chaque niveau de détail est souvent négligée. En effet, la précision fine de la quantification initiale est nécessaire pour des maillages intermédiaires de haute résolution comportant un nombre important d'éléments, mais cette précision est inutile pour ceux de basse résolution. La précision

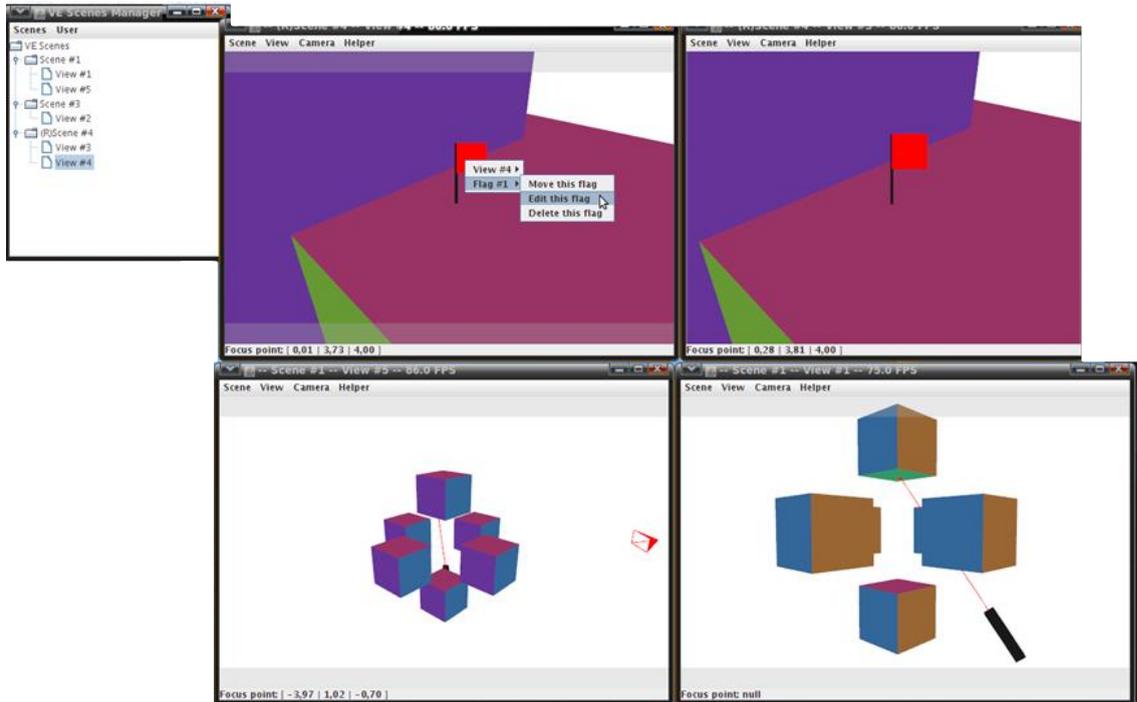


FIGURE 1.3 – Un prototype du sous-projet Client. L'utilisateur peut visualiser les objets 3D et peut marquer un point d'intérêt avec un drapeau sur ces objets pour faciliter une collaboration.

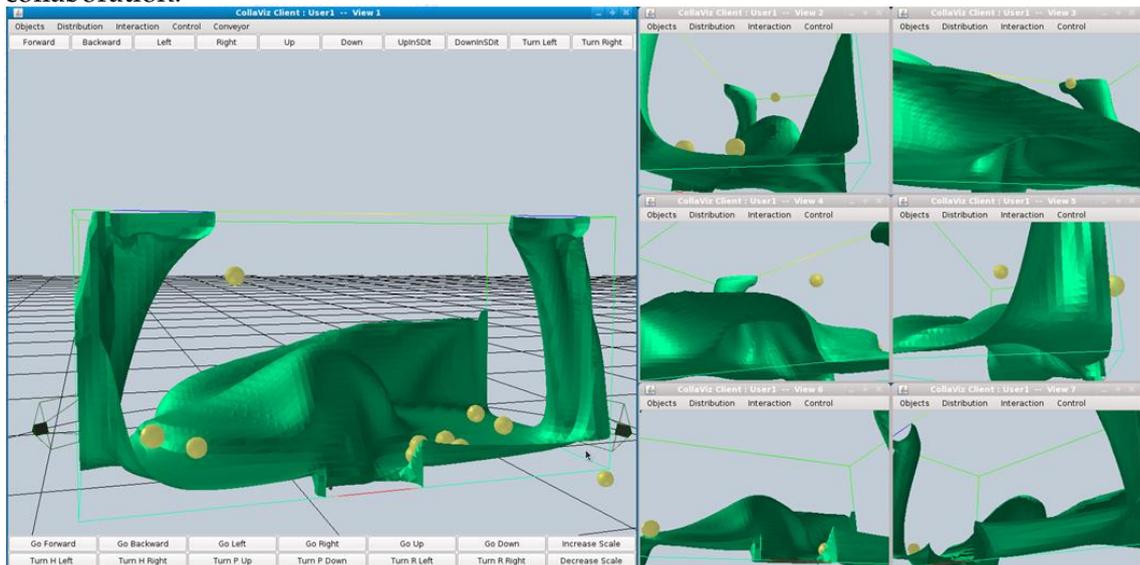


FIGURE 1.4 – Un prototype du sous-projet Collaboration. La détection de collision est développée pour attacher de manière appropriée des annotations sur les objets 3D.

de quantification correspond au nombre de bits utilisés pour la quantification. Notre méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion consiste donc à adapter cette précision de quantification à la complexité géométrique de chaque maillage intermédiaire. De cette manière, les coordonnées des sommets sont transmises progressivement.

Ensuite, nous étendons cette méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion aux maillages avec attributs couleur. La couleur étant représentée avec un certain nombre de bits après une quantification, nous adoptons également la précision de quantification de la couleur à chaque maillage intermédiaire. Le codage naïf de la couleur étant très lourd (24 bits par sommet), une méthode de compression efficace et adaptée est nécessaire. Pour cela, nous proposons une méthode basée sur la prédiction qui exploite non seulement la cohérence dans le voisinage, mais aussi la discontinuité de la couleur présente sur la surface. Une autre méthode de compression de la couleur basée sur une table de correspondance combinée avec une réduction du nombre de couleur est également proposée. En termes de contribution à la qualité visuelle, la couleur joue également un rôle essentiel. Ainsi, il est important de préserver les éléments caractéristiques liés à la couleur afin d'approximer plus fidèlement le maillage original. Dans ce but, une métrique est proposée pour préserver de manière adaptative les éléments caractéristiques à chaque niveau de détails.

Une autre problématique majeure concerne la protection des données 3D pendant la transmission. En effet, les maillages peuvent être facilement dupliqués et redistribués par un pirate. Cette violation de la propriété intellectuelle peut engendrer des pertes financières aux propriétaires de ces maillages. En outre, les maillages résultant de la simulation ont souvent besoin d'une bonne protection pour maintenir leur confidentialité. Pour répondre à ces besoins, une technique de tatouage peut être une bonne solution, en étant associée à des restrictions d'accès ainsi que du cryptage. Ces techniques cachent une information secrète dans le maillage et cette information peut être extraite et utilisée pour justifier le droit d'auteur lors d'un conflit. Ainsi, pour une transmission à la fois efficace et sécurisée, nous proposons une méthode conjointe de compression progressive et de tatouage. Jusqu'à présent, la compression et le tatouage pour les maillages sont étudiés séparément, principalement à cause de propriétés contradictoires de ces deux techniques. En effet, l'insertion du tatouage modifiant légèrement la géométrie peut introduire une déformation sérieuse et peut également dégrader la performance du taux de compression. Inversement, la compression peut être considérée comme une attaque perturbant l'extraction correcte du tatouage inséré. Pour réaliser correctement le système conjoint, le tatouage inséré doit être robuste à la compression. De plus, dans le cadre de la transmission progressive, chaque maillage intermédiaire devant être protégé,

on doit pouvoir extraire le tatouage à chaque étape de raffinement. C'est pourquoi, dans notre méthode, le tatouage est effectué dans le mécanisme de la compression, à chaque itération de l'encodage. La robustesse de ce tatouage est un autre problème important, puisque des pirates peuvent tenter d'enlever le tatouage en modifiant le maillage tatoué. Pour obtenir une robustesse contre diverses attaques, nous utilisons une propriété statistique du maillage pour l'insertion, en modifiant la distribution des normes des sommets. Pour les applications visées, la reconstruction du maillage original est cruciale dans notre travail. Une technique classique de tatouage modifiant la géométrie de manière définitive n'est donc pas adaptée. Pour cela, nous utilisons une technique de tatouage réversible (appelée également *sans perte*), par le fait que cette technique permet de supprimer la déformation provoquée par l'insertion du tatouage à l'extraction. L'utilisation de cette technique de tatouage réversible conjointement à la compression progressive permet donc une transmission efficace, sécurisée et sans perte. La déformation géométrique causée par l'insertion du tatouage résulte en une augmentation du coût de codage géométrique. Pour réduire ce surcoût, nous utilisons une nouvelle méthode de prédiction adaptée pour notre système conjoint.

La suite du manuscrit est organisée comme suit. Dans le chapitre 2, nous présentons une nouvelle méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion pour la compression progressive de maillages 3D, en se basant sur l'adaptation de la quantification à chaque maillage intermédiaire. Cette adaptation s'effectue localement à chaque itération de l'encodage en choisissant la meilleure opération entre la diminution du nombre d'éléments et la diminution de la précision de quantification. Cette adaptation s'effectue dans un premiers temps de manière optimale en mesurant la distorsion entre le maillage intermédiaire courant et l'original et en calculant l'entropie des deux opérations candidates. Cette mesure de distorsion nécessitant un temps de calcul très long, nous proposons une méthode d'adaptation basée sur un apprentissage pour une optimisation rapide. En outre, un nouveau codeur géométrique est proposé afin de réduire le coût de la géométrie, en se basant sur une bijection discrète.

Le chapitre 3 traite de l'optimisation du compromis débit-distorsion pour des maillages avec attributs couleur en adaptant la précision de quantification de la couleur et de la géométrie à chaque niveau de détail. Une méthode permettant d'effectuer l'optimisation de manière rapide est également proposée. Afin d'améliorer d'avantage la performance débit-distorsion, nous proposons une métrique pour estimer l'importance de chaque couleur et préserver les sommets visuellement importants.

Dans le chapitre 4, nous présentons une méthode conjointe de compression progressive et de tatouage réversible. Le tatouage robuste est inséré à chaque étape de l'enco-

dage afin de protéger chaque niveau de détails et afin qu'on puisse extraire le tatouage à chaque raffinement lors de la décompression. La reconstruction exacte du maillage original étant un objectif important, le tatouage inséré est de type réversible c'est-à-dire que la déformation peut être enlevée à l'extraction. Pour optimiser la transmission, nous utilisons une méthode de prédiction adaptée qui permet de réduire le surcoût de codage liée à l'insertion du tatouage.

Enfin, dans le chapitre 5, nous résumons les contributions présentées dans ce manuscrit et proposons les principales perspectives pour de futures travaux.

Compression progressive de maillages sans attributs couleur

Sommaire

2.1	Etat de l'art	10
2.1.1	Approches mono-résolution	10
2.1.2	Approches progressives	15
2.1.2.1	Approches guidées par la connectivité	15
2.1.2.2	Approches guidées par la géométrie	18
2.1.2.3	Allocation binaire	21
2.2	Algorithme de base	22
2.3	Codeur géométrique	25
2.3.1	Rotation bijective en 2D	28
2.3.2	Rotation bijective en 3D et la minimisation de l'angle de rotation	29
2.4	Optimisation du compromis débit-distorsion	36
2.4.1	Changement de la précision de quantification	39
2.4.2	Détermination optimale de la précision de quantification	40
2.4.3	Détermination quasi-optimale de la précision de quantification	42
2.5	Résultats expérimentaux	45
2.5.1	Taux de compression sans perte	45
2.5.2	Performance débit-distorsion	46
2.5.3	Robustesse de la méthode quasi-optimale	47
2.5.4	Temps de traitement	51
2.6	Conclusion	54

Nous nous intéressons dans ce premier chapitre à la compression progressive de maillage 3D sans attribut de couleur et plus précisément, à l'optimisation du compromis débit-distorsion en nous appuyant sur l'adaptation de la précision de quantification à la complexité géométrique de chaque maillage intermédiaire. Cette adaptation de quantification peut être réalisée de manière optimale en mesurant directement l'erreur géométrique par rapport au modèle original, ou de façon quasi-optimale en évaluant la complexité géométrique grâce à un modèle théorique afin de réduire le temps de calcul nécessaire pour l'encodage. En outre, nous proposons une nouvelle méthode de codage de la géométrie qui se base sur une bijection discrète afin de réduire la taille du fichier compressé.

2.1 Etat de l'art

Dans cette section, nous présentons un état de l'art complet des méthodes de compression sans pertes de maillages surfaciques en les classifiant en deux grandes catégories : les méthodes mono-résolutions et les méthodes progressives. Bien que nos travaux concernent uniquement les approches progressives, il paraît pertinent de présenter également les méthodes mono-résolutions dans cet état de l'art pour des raisons historiques mais aussi en raison de leur lien direct avec la plupart des méthodes progressives (de nombreuses méthodes progressives trouvent leurs origines dans des méthodes non progressives).

Notre objectif étant d'optimiser le compromis débit-distorsion pour la compression progressive sans pertes, nous nous limitons dans cet état de l'art aux méthodes qui permettent de reconstruire de manière exacte la connectivité et la géométrie du maillage original. Les lecteurs intéressés par les méthodes autorisant une perte d'information sont invités à se référer aux états de l'art d'Alliez et Gotsman [AG05] et de Peng et al. [PKJ05].

2.1.1 Approches mono-résolution

Les approches mono-résolution sont les premières à avoir été proposées dans la communauté de la compression de maillages surfaciques. L'objectif principal de ces méthodes est d'encoder un maillage surfacique sous un format binaire de taille minimale, en éliminant notamment la redondance présente dans la représentation originale du maillage en entrée.

En 1995, Deering [Dee95] a introduit la première méthode de compression de maillage.

Dans cette méthode, la connectivité est représentée par un ensemble de *bandes de triangles généralisées*. Une bande de triangles généralisée peut être décrite par une séquence des indices de sommet puisque l'insertion d'un nouveau sommet forme un triangle avec deux sommets dans la séquence. Dans ses travaux, Deering code l'insertion d'un sommet en utilisant un symbole M ou N pour décrire la manière dont ce nouveau sommet forme un triangle avec deux autres sommets de la séquence. L'auteur utilise également une mémoire tampon pour stocker les indices des sommets dernièrement traités, afin de réduire la taille de la trame binaire.

En se basant sur l'observation de Turan [Tur84], Taubin et Rossignac [TR98] ont proposé une approche appelée *chirurgie topologique*. Cette méthode utilise deux *arbres couvrants* pour coder la connectivité. Un premier arbre couvrant de sommets est d'abord généré et le maillage est découpé selon les arêtes de cet arbre. Le maillage est représenté par un simple polygone planaire. Un deuxième arbre couvrant de triangles est ensuite établi afin de décrire comment les triangles forment ce polygone. Finalement, ces deux arbres sont codés à l'aide d'un codeur arithmétique. Dans cette méthode, le codage de la connectivité nécessite un coût variant entre 2,5 et 7 bps (bits par sommet).

Une autre méthode basée sur des bandes de triangles est proposée par Bajaj et al. [BPZ99b]. D'abord, le maillage est décomposé de manière concentrique en plusieurs couches de sommets et en plusieurs couches de triangles. Chaque couche de triangles est formée de triangles se situant entre deux couches successives de sommets. Pour la connectivité, les auteurs codent le nombre de couches de sommets, le nombre de sommets dans chaque couche et la structure de chaque bande de triangles. Pour la connectivité, cette méthode nécessite entre 1,4 et 6,1 bps.

En 1998, Touma et Gotsman [TG98] ont introduit un algorithme basé sur la conquête d'arêtes. Cet algorithme, considéré comme l'un des plus efficaces, consiste à parcourir les sommets en partant d'un triangle germe choisi arbitrairement. D'abord, la frontière initiale est formée par les arêtes du triangle germe pour séparer la surface en région interne (constituée des éléments déjà traités) et en région externe. La région interne s'agrandit progressivement en parallèle à la conquête. L'algorithme se termine lorsque toutes les arêtes du maillage sont parcourues. Le parcours commence par mettre les trois sommets du triangle germe dans une liste appelée *liste active*. Ensuite, à chaque étape, un sommet est retiré et ses sommets adjacents non encore traités sont empilés dans la liste active. Afin de permettre au décodeur de reconstruire exactement la connectivité, en plus des valences des sommets, quelques codes incidents sont codés. L'efficacité de cet algorithme repose sur la distribution homogène des valences de sommets, qui est en général centrée autour de 6. Par conséquent, la connectivité d'un maillage régulier est

codée de manière optimale. La connectivité des maillages de référence nécessite 1,5 bps en moyenne.

Plus tard, une extension de l'algorithme de Touma et Gotsman [TG98] a été proposée par Alliez et Desbrun [AD01b]. Les auteurs proposent un ensemble de règles pour réduire le coût de la connectivité en minimisant l'occurrence des codes incidents. Par rapport à la méthode initiale, cette méthode présente un meilleur taux de compression, en particulier pour les maillages irréguliers, qui génèrent en général un nombre important de codes incidents. Les auteurs ont également démontré que la borne supérieure du codage de la connectivité est de 3,24 bps dans leur méthode.

Gumhold et Straßer [GSe98] ont introduit une méthode qui est cette fois-ci basée sur la conquête de triangles. Similairement à [TG98], les arêtes du triangle germe forment la frontière initiale. La région interne, comportant les éléments qui sont déjà traités, s'agrandit au fur et à mesure en intégrant un triangle à chaque étape. Pour chaque triangle inséré, un symbole parmi cinq est associé et codé, pour permettre au décodeur de parcourir et de reconstruire de la même manière la connectivité. Cette méthode présente d'ailleurs un autre avantage : une faible complexité en temps de décompression.

Rossignac [Ros99] a proposé une méthode similaire, connue sous le nom d'*Edgebreaker*. Cette méthode insère un nouveau sommet dans la région interne en codant un symbole d'une autre base de 5 symboles. Plus tard, King et Rossignac [KR99a] ont proposé une extension de cette méthode pour garantir un coût de codage maximal de 3,67 bps. Szymczak et al. [SKR00] ont également présenté une autre extension permettant de coder de manière plus efficace les maillages réguliers : cette méthode assure un débit maximal de 1,622 bps en cas de maillages larges et réguliers.

Parallèlement au codage de la connectivité, l'information géométrique doit être aussi codée. Généralement, le codage de la géométrie se réalise en trois étapes : quantification, prédiction, et codage du vecteur différence. Tout d'abord, une quantification est appliquée aux coordonnées des sommets afin de réduire leur précision sans induire une déformation perceptible. Ensuite, une technique de prédiction est utilisée pour exprimer la position d'un sommet par rapport aux sommets précédemment visités. Ce codage prédictif exploite la corrélation entre la position du sommet courant et son voisinage local pour coder plus efficacement la géométrie. Finalement, le vecteur différence entre la position prédite et la position originale est codé.

Parmi les nombreuses méthodes de prédiction géométrique, les trois méthodes les plus populaires sont :

- la prédiction différentielle [Dee95],

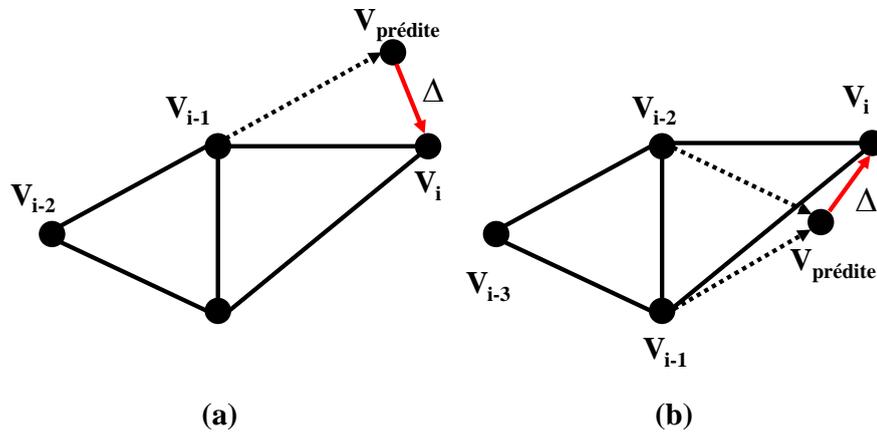


FIGURE 2.1 – Prédiction linéaire (à gauche) et prédiction par la règle du parallélogramme (à droite). On code le vecteur différence Δ entre la position du sommet courant V_i et la position prédite $V_{prédite}$.

- la prédiction linéaire [TR98],
- la prédiction par la règle du parallélogramme [TG98], [SKL03], [KPR05] et [COCI02].

La prédiction linéaire et la prédiction par la règle du parallélogramme sont illustrées dans la figure 2.1. Les sommets récemment visités lors du parcours topologique sont utilisés pour calculer la position prédite $V_{prédite}$. Ensuite, le vecteur différence Δ entre la position du sommet courant V_i et $V_{prédite}$ est codé.

Plus tard, plusieurs extensions de la prédiction par la règle du parallélogramme ont été proposées. La méthode de Sim et al. [SKL03] applique deux prédictions par la règle du parallélogramme quand c'est possible. Ensuite, la position du sommet courant est prédite par la position moyenne des résultats de ces deux prédictions. Cette technique de prédiction permet d'encoder la géométrie plus efficacement que la méthode originale. Dans [KPR05], Kälberer et al. ont proposé une méthode basée sur trois prédictions par la règle du parallélogramme. Deux arêtes opposées au sommet courant sont utilisées pour les deux premières prédictions comme dans [SKL03], et une arête virtuelle reliant deux sommets extérieurs de ces deux arêtes est utilisée pour la troisième prédiction. Cohen-Or et al. [COCI02] ont présenté une méthode qui applique la prédiction par la règle du parallélogramme en utilisant toutes les arêtes possibles. Cette méthode de prédiction se révèle plus efficace que la prédiction originale de Touma et Gotsman [TG98], Sim et al. [SKL03] et Kälberer et al. [KPR05]. Courbet et Hudelot [CH11] ont introduit une méthode de prédiction basée sur l'expansion de Taylor. Cette méthode permet de pondérer de façon optimale les sommets utilisés dans les différents mécanismes de la prédiction, en optimisant l'efficacité du codage. Notons qu'il existe aussi une prédiction

linéaire de second ordre [BPZ99b] et une prédiction non linéaire [GA03].

Les techniques les plus efficaces de codage de la connectivité ne nécessitent que quelques bits par sommet et leur performance est considérée comme très proche de la limite théorique. Par contre, le codage de la géométrie est en général loin d'être optimal puisque les méthodes de prédiction n'exploitent pas de façon optimale l'information de voisinage du fait que le parcours est guidé par la connectivité. En observant que la géométrie occupe une partie dominante dans le fichier compressé, des méthodes ont été proposées plus récemment pour favoriser le codage de la géométrie plutôt que celui de la connectivité.

La première approche dirigée par la géométrie est proposée par Kronrod et Gotsman [KG00]. Dans cette approche, le parcours du maillage est guidé par la géométrie en utilisant un arbre de prédiction. En comparant aux méthodes dirigées par la connectivité, cette méthode donne de meilleurs résultats en termes de taux de compression, en particulier pour des modèles CAO. Plus tard, Lee et al. [LAD02] ont proposé une autre méthode dirigée par la géométrie, qui permet de traiter des maillages composés de triangles et de quadrangles. L'ordre du parcours est déterminé par la géométrie, en choisissant la prochaine arête à traiter pour que le contour actif, qui sépare la région interne et la région externe, soit le plus convexe possible. De cette manière le nombre de codes incidents est réduit, optimisant le codage de la connectivité. En outre, les auteurs utilisent une prédiction basée sur les angles et la quantification des coordonnées angulaires dans un repère local qui permettent un codage plus efficace et une meilleure qualité visuelle que la méthode pionnière de Touma et Gotsman [TG98].

Kälberer et al. [KPR05] ont proposé une nouvelle méthode basée sur la valence. Contrairement aux méthodes précédentes [AD01b, TG98], cet algorithme code le nombre des voisins non parcourus de chaque sommet pour coder la connectivité. De manière similaire à [LAD02], le parcours est déterminé par la géométrie. Pour cette dernière, les auteurs séparent d'abord la position en composantes tangentielle et normale. Ensuite, une méthode de prédiction multiple est utilisée, similairement à [COCI02]. Le coût total du codage est réduit de 27 % en moyenne par rapport à [LAD02].

Plus récemment, Lewiner et al. [LCL*06] ont proposé une méthode dirigée par la géométrie. La géométrie est d'abord codée de manière indépendante de la connectivité, par subdivision en kd-tree. Ensuite l'information nécessaire pour reconstruire la connectivité originale à partir du nuage de points est codée. En terme de taux de compression, cette méthode produit des résultats similaires à [Ros99].

Les méthodes mono-résolution donnent généralement de meilleurs résultats que les méthodes multi-résolution en termes de taux de compression. Par contre, les mé-

thodes multi-résolution offrent la possibilité d'une transmission progressive, permettant d'adapter les modèles 3D à la capacité de la visualisation et à la bande-passante du client. Dans la section suivante, nous présentons ces méthodes progressives.

2.1.2 Approches progressives

Contrairement aux méthodes mono-résolution, les méthodes de compression progressive permettent la visualisation et la transmission progressive des objets 3D sous différents niveaux de détails ; un maillage de base (la version la plus grossière) est d'abord transmis avec peu de bits, puis des informations de raffinement sont transmises pour améliorer de plus en plus la qualité de la représentation. Ces techniques de compression progressive offrent aussi la possibilité d'adapter la complexité du maillage aux capacités des diverses ressources du client.

L'enjeu principal des méthodes progressives consiste à reconstruire les modèles intermédiaires aussi fidèlement que possible à l'original pour tous les débits. Autrement dit, on cherche à optimiser le compromis débit-distorsion.

Dans cette section, nous présentons les algorithmes de compression progressive en les classifiant selon s'ils sont dirigés par la connectivité ou par la géométrie. Nous présentons également les méthodes d'*allocation binaire* qui sont utilisées dans le but d'optimiser le compromis débit-distorsion.

2.1.2.1 Approches guidées par la connectivité

Les méthodes de compression progressive guidées par la connectivité sont les premières à avoir été proposées dans le domaine.

La première méthode de compression progressive a été proposée par Hoppe [Hop96] en 1996. Cette nouvelle représentation de maillage dite *maillages progressifs* consiste à appliquer itérativement une opération de contraction d'arête pour générer différents niveaux de détails. L'opération de contraction d'arête, illustrée dans la figure 2.2, enlève une arête en fusionnant ses deux sommets A et B. La reconstruction, lors du décodage, est réalisée en insérant un sommet à chaque itération par séparation de sommet. Pour la connectivité, l'information des arêtes à séparer permettant de restaurer la connectivité initiale est codée. Afin d'optimiser la qualité d'approximation tout au long de la simplification, l'auteur sélectionne la meilleure arête suivant une fonction d'énergie liée à la géométrie, qui est précédemment utilisée pour une *optimisation de maillage* [HDD*93]. Malgré son côté novateur, cette méthode de compression progressive n'est pas très efficace, notamment à cause du coût important nécessaire pour la localisation des opéra-

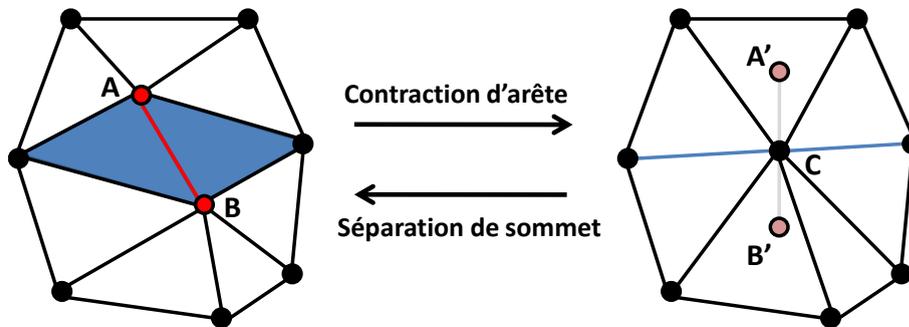


FIGURE 2.2 – La contraction d’arête.

tions de contraction d’arête.

Taubin et al. [TGHL98] ont proposé une extension de la méthode mono-résolution de Taubin et Rossignac [TR98]. De manière similaire à la méthode de Hoppe [Hop96], l’information de raffinement est transmise progressivement. La différence majeure est que cette méthode utilise l’opération de séparation de forêt (*forest split operation* en anglais) pour insérer un ensemble de sommets à chaque itération au prix d’une granularité moins fine. Au cours de la décompression, une forêt de sommets (ensemble des arbres de sommets) est construite à chaque itération et le maillage courant est découpé selon les arêtes de cette forêt. Les bords concernés sont ensuite dupliqués et écartés et les trous résultants sont remplis avec des triangles. Chaque opération de séparation de forêt peut doubler le nombre de triangles. Pour la connectivité, cette méthode encode l’information de la structure de la forêt et de la retriangulation des trous. Pour la géométrie, une méthode de lissage est utilisée afin de prédire efficacement la position de chaque sommet. Cet algorithme a besoin de 7 à 10 bps pour le codage de la connectivité.

Pajarola et Rossignac [PR00] ont proposé une autre extension des *maillages progressifs*. Similairement à [TGHL98], cette méthode optimise le codage de la connectivité en appliquant des opérations de séparation de sommets en lot. A chaque itération, chaque sommet est marqué avec un bit afin de déterminer les sommets à séparer. Pour la géométrie, les auteurs proposent une nouvelle prédiction, inspirée de la subdivision *butterfly* de [DLG90, ZSS96]. Dans la figure 2.2, les positions obtenues par cette prédiction A' et B' sont utilisées pour coder respectivement A et B . La connectivité est codée avec 7 bps en moyenne.

Karni et al. [KBG02] ont proposé une autre méthode basée sur la contraction d’arête. D’abord, une séquence d’arêtes reliant tous les sommets du maillage est générée pour chaque maillage intermédiaire. Cette séquence est établie de manière à minimiser le nombre de sauts, qui relient deux sommets non connectés par une arête. Ensuite, le

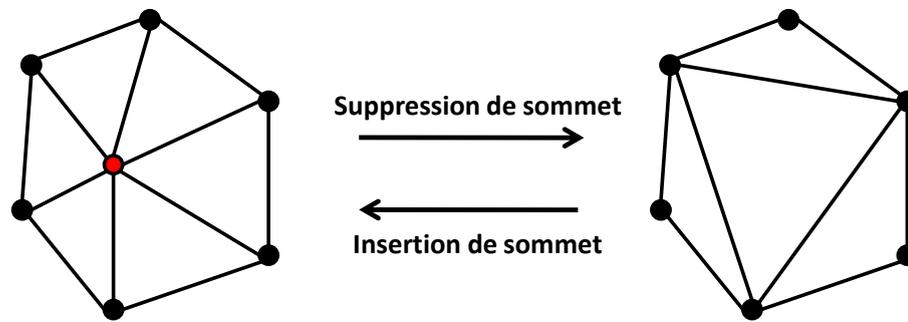


FIGURE 2.3 – La suppression de sommet.

maillage courant est simplifié en contractant chaque paire de sommets de la séquence. Grâce à la bonne propriété locale de cette séquence, la géométrie peut être encodée de manière efficace et cette méthode donne également de résultats satisfaisant en termes du compromis débit-distorsion.

Jusqu'ici, la contraction d'arête est utilisée comme l'opération de simplification. Il existe aussi des méthodes basées sur l'opération de suppression de sommets. Cette opération consiste à enlever un sommet et à retriangler le trou résultant, comme nous montre la figure 2.3. Pour la connectivité, la localisation du patch (ensemble de triangles issus de la retriangulation) et l'information de retriangulation doivent être codées.

Cohen-Or et al. [COLR99] ont proposé une première méthode basée sur la suppression de sommet. A chaque itération, un ensemble de sommets indépendants (sommets non reliés entre eux par des arêtes) est décimé. Pour permettre au décodeur de localiser correctement les patches, les triangles de chaque patch sont colorés en utilisant 2 ou 4 couleurs. La retriangulation est réalisée de façon déterministe pour réduire à néant le coût nécessaire. Cette approche basée sur la coloration code la connectivité avec 6 bps en moyenne. Pour la géométrie, la position du sommet courant est prédite à partir de la position moyenne des sommets voisins (les sommets du patch). Cette méthode présente des résultats intéressants en termes de taux de compression, mais la qualité d'approximation des maillages intermédiaires est en général pauvre, puisque la retriangulation déterministe en forme de Z de chaque patch produit souvent des maillages dégénérés, comportant un nombre important de triangles longs et fins.

Alliez et Desbrun [AD01a] proposent une extension des algorithmes de compression mono-résolution [AD01b, TG98] basés sur la valence. Un ensemble de sommets indépendants est enlevé à chaque itération par deux opérations de décimation pour générer les niveaux de détails. La retriangulation est effectuée de manière à optimiser la qualité géométrique des maillages intermédiaires en préservant le mieux possible la régularité. Cette méthode code la connectivité avec 3,7 bps en moyenne. La position moyenne des

sommets voisins est utilisée pour prédire la position de chaque sommet. Cet algorithme étant utilisé comme un algorithme de base pour notre approche d'optimisation du compromis débit-distorsion, il est décrit plus en détails dans la section 2.2.

Récemment, Ahn et al. [ALA*10] ont proposé une extension de [ADo1a] en codant la géométrie de manière plus efficace, par utilisation de la transformée de Karhunen-Loève et le codage par plan de bits. Le débit nécessaire pour la géométrie est réduit significativement, ce qui permet d'optimiser la performance débit-distorsion.

Bajaj et al. [BPZ99a] ont généralisé la méthode mono-résolution basée sur la décomposition en couches [BPZ99b] à la compression progressive de maillages. A chaque itération, le maillage est décomposé en couches de sommets et en couches de triangles (i.e. bandes de triangles généralisées), de manière identique à [BPZ99b]. Pour réaliser la transmission progressive, le maillage est simplifié à chaque itération par trois opérations : simplification intra-couche, simplification inter-couche et contraction de triangle généralisée. En ce concerne le codage de la géométrie une méthode de prédiction de second ordre est utilisée.

Dans [VPo4], Valette et Prost ont proposé une méthode basée sur l'analyse par ondelettes. Contrairement aux autres méthodes de compression par ondelettes [KSSoo, KGo2] qui ne permettent pas de compression sans pertes des maillages irréguliers, cette méthode est capable de reconstruire la connectivité originale en utilisant une base de subdivision plus riche. Plus précisément, le maillage en entrée est simplifié itérativement par un nouveau schéma de subdivision inverse, et l'information de cette subdivision inverse est codée pour la connectivité. Pour la géométrie, les coefficients obtenus au cours de la décomposition par ondelettes sont codés. Cette méthode donne de meilleurs résultats que [ADo1a, KBGo2].

2.1.2.2 Approches guidées par la géométrie

Les approches guidées par la connectivité permettent une compression compacte de l'information topologique. Par contre le codage de la géométrie n'est souvent pas optimisé puisqu'il est guidé par la connectivité. Les approches plus récentes ont donné la priorité à la géométrie afin de réduire davantage le débit total.

Gandoin et Devillers [GDo2] ont introduit un premier algorithme guidé par la géométrie, basé sur la subdivision de l'espace par kd-tree. Cet algorithme de compression procède en deux passes ; une première passe est utilisée pour coder uniquement la géométrie. L'espace est subdivisé récursivement en deux cellules jusqu'à ce que chaque cellule possède un ou zéro sommet, ensuite le nombre de sommets d'une des deux cel-

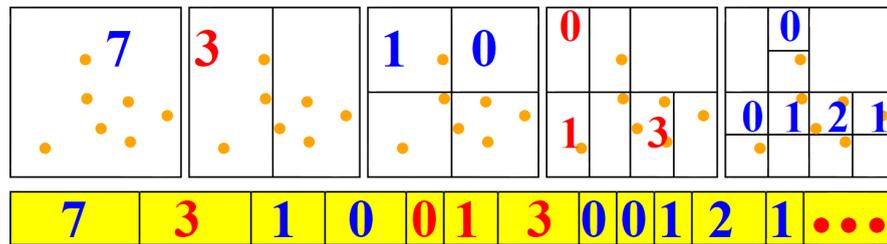


FIGURE 2.4 – Le codage de la géométrie par décomposition en kd-tree. Image tirée de [GD02].

lules est codé. Cette information du nombre de points de chaque cellule est suffisante pour reconstruire la géométrie. Un exemple en 2D de ce codage par occurrence de points est illustré dans la figure 2.4.

Une deuxième passe consiste à coder la connectivité. Pour chaque raffinement, le changement de la connectivité induit par la subdivision par kd-tree est codé en utilisant des opérations de séparation de sommet. En termes de taux de compression, cette méthode donne de meilleurs résultats que les algorithmes guidés par la connectivité.

Peng et Kuo [PK05] ont proposé une autre méthode guidée par la géométrie basée sur la subdivision par octree. A chaque itération, une cellule est divisée en huit cellules-filles. Au lieu du nombre de sommets dans chaque cellule-fille, la configuration des cellules-filles non vides est codée pour chaque subdivision. La connectivité est codée de manière similaire à [GD02]. Les auteurs ont proposé des techniques de prédiction pour la connectivité et la géométrie, qui donnent d'excellents résultats en termes de taux de compression, meilleurs que [GD02]. En outre, afin d'optimiser le compromis débit-distorsion, l'ordre de la subdivision des cellules est déterminé suivant des critères géométriques.

Récemment, Valette et al. [VCP09] ont proposé une nouvelle méthode de compression progressive basée sur le principe de reconstruction. Le maillage de base est raffiné successivement en utilisant une opération de séparation d'arête qui insère un sommet au milieu de l'arête. A chaque itération, l'arête la plus longue est choisie pour insérer un sommet. Cette stratégie de raffinement permet de générer des maillages intermédiaires possédant une distribution uniforme de sommets sur la surface. Durant la reconstruction, la quantité d'information de la connectivité est réduite significativement ce qui optimise le compromis débit-distorsion. Dans le même objectif, la précision des positions des sommets est transmise progressivement. La connectivité exacte est restaurée uniquement après la transmission totale de la géométrie en utilisant des bascules d'arêtes. Cet algorithme donne d'excellents résultats en termes de taux de compression et de compromis débit-distorsion, en particulier pour des modèles lisses. Un défaut de

cette méthode est que la performance peut être dégradée pour des modèles complexes car la performance dépend fortement de l'ordre d'insertion des sommets, qui n'est pas toujours optimal pour ces modèles.

Dans [PHK*10], Peng et al. ont proposé une autre méthode basée sur la reconstruction. D'abord, les sommets du maillage sont regroupés en plusieurs ensembles à l'aide de l'algorithme de clustering de Lloyd. Ensuite un représentant (un sommet) est calculé pour chaque ensemble et le maillage de base est généré en reliant ces représentants suivant la condition de proximité des ensembles. A chaque itération, le maillage est raffiné en divisant chaque ensemble en sous-ensembles et en insérant les nouveaux sommets qui sont les représentants des sous-ensembles. Une métrique est proposée pour guider la génération des sous-ensembles et pour sélectionner le représentant de telle sorte que la qualité visuelle soit optimisée dans chaque étape intermédiaire. Pour la géométrie, il est nécessaire d'encoder le nombre de sous-ensembles et la distance entre chaque représentant d'un sous-ensemble et le représentant de l'ensemble-père. Pour encore améliorer le compromis débit-distorsion, les auteurs adoptent un système local de coordonnées cylindriques pour prendre en compte l'importance relative de la composante tangentielle et normale suivant la configuration de la surface locale concernée. Cette importance relative est ensuite utilisée pour quantifier de manière adaptative chaque composante. Cette méthode permet de préserver les éléments caractéristiques du maillage original à bas débit, et donne d'excellents résultats en termes de compromis débit-distorsion.

Mamou et al. [MDCG10] ont proposé très récemment une méthode, basée sur une approximation de la surface. Tout d'abord une surface d'approximation est générée en utilisant la connectivité initiale, un ensemble de points de contrôle et un ensemble d'arêtes saillantes puis ces informations sont encodées. Ensuite, les auteurs parcourent le maillage et la position de chaque sommet est encodée en utilisant la position du sommet correspondant de la surface d'approximation. L'ordre de parcours est déterminé suivant l'erreur quadratique [GH97] pour une optimisation du compromis débit-distorsion. Pendant la décompression, la connectivité originale, les points de contrôle et les arêtes saillantes sont d'abord restaurés pour générer la surface d'approximation. A chaque itération, un sommet de cette surface d'approximation retrouve sa position originale. Cette méthode présente d'excellents résultats en termes de taux de compression et débit-distorsion. Par contre, un désavantage de cette méthode est le temps de traitement très important, dû notamment au calcul de la surface d'approximation.

L'enjeu principal des méthodes progressives est d'optimiser le compromis débit-distorsion afin d'obtenir à tout moment la meilleure représentation possible. Dans la section suivante, nous présentons les méthodes d'allocation binaire qui sont utilisées

dans le but d'optimiser le compromis débit-distorsion.

2.1.2.3 Allocation binaire

L'enjeu principal de la compression progressive est d'optimiser le compromis débit-distorsion. Autrement dit, on souhaite obtenir une meilleure qualité visuelle pour tous les débits.

Pour cet objectif, une technique d'*allocation binaire* est souvent utilisée. Dans le cas de maillages triangulaires, cette technique consiste en général à minimiser l'erreur géométrique en adaptant la quantification de la géométrie à la complexité du maillage dans le domaine spatial ou dans le domaine fréquentiel et de manière globale ou locale, pour un débit imposé.

Chow [Cho97] a proposé une méthode d'allocation binaire dans le cadre de la compression mono-résolution. Cette méthode consiste à décomposer le maillage en plusieurs régions suivant le niveau de complexité en considérant la taille et la courbure des triangles. Ensuite les sommets des différentes régions sont quantifiés avec des précisions adaptées, déterminées suivant la valeur de complexité.

Li et Kuo [LK98] ont proposé une méthode d'allocation binaire pour la compression progressive. D'abord, tous les sommets sont regroupés en plusieurs groupes suivant leur valeur d'erreur de prédiction. Ensuite, les sommets d'un groupe sont insérés à chaque itération de décodage pour raffiner le maillage. Lorsqu'un groupe des sommets est inséré, la précision de quantification de tous les sommets présents augmente d'un bit. Cette adaptation de la précision de quantification au nombre des éléments est effectuée afin d'optimiser le compromis débit-distorsion. Valette et al. [VCP09] ont proposé une méthode permettant également de transmettre avec une précision progressive les coordonnées des sommets pendant la reconstruction. Lors d'une insertion d'un sommet, sa précision de quantification est déterminée en se basant sur la configuration locale géométrique, et les coordonnées des sommets voisins sont raffinées. Les résultats montrent que cette adaptation de quantification améliore le compromis débit-distorsion à bas débit. Ces méthodes d'allocation binaire permettent d'adapter la quantification pour chaque niveau de détail, pourtant l'augmentation de la précision de quantification n'est pas encodée efficacement (transmission d'un bit pour chaque coordonnée).

Payan et Antonini [PA05] ont proposé une méthode d'allocation binaire pour la compression par ondelettes. En se basant sur la méthode de remaillage *normal mesh* [GVSS00], la précision de quantification des coefficients d'ondelettes de chaque sous-bande est optimisée de manière à minimiser l'erreur géométrique pour un débit donné.

Des modèles théoriques pour le débit et la distorsion sont aussi proposés afin de réduire la complexité en temps. King et Rossignac [KR99b] ont proposé une méthode d'allocation qui permet d'obtenir une relation entre le nombre de sommets et la précision de quantification optimisant la qualité géométrique sous la contrainte d'un débit, à l'aide d'un modèle théorique. Ces méthodes permettent d'améliorer le compromis débit-distorsion de façon rapide à l'aide des modèles théoriques. Par contre, ces méthodes n'autorisent pas une transmission progressive. Une réception supplémentaire de bits ne permet pas le raffinement du maillage intermédiaire actuel, ainsi, pour un autre débit, tout le processus doit être effectué à nouveau.

Les méthodes de compression mono-résolution donnent d'excellents résultats en termes de taux de compression, mais les fichiers compressés peuvent être encore gros pour être transmis à bas débits. Nous avons donc choisi d'utiliser une transmission progressive, puisque les méthodes de cette catégorie permettent d'adapter la complexité du modèle. Ainsi les utilisateurs peuvent visualiser les différents niveaux d'une hiérarchie du modèle en fonction du débit et d'autres ressources. Le compromis débit-distorsion étant un critère le plus important, nous proposons dans ce chapitre de l'optimiser par une approche basée sur une adaptation de la précision de quantification pour chaque maillage intermédiaire. Nous avons choisi une approche dirigée par la connectivité plutôt qu'une approche dirigée par la géométrie, puisque les méthodes dirigées par la connectivité produisent en général des maillages intermédiaires d'une plus haute qualité, surtout à bas débit. Plus précisément, nous nous intéressons à une optimisation du débit-distorsion. Notre approche est progressive et adapte la précision de quantification pour chaque niveau de résolution. A la décompression, le nombre de sommets d'un maillage de base ainsi que la précision des coordonnées augmentent progressivement. Pour optimiser le compromis débit-distorsion, l'augmentation de la précision de quantification est codée de manière efficace en utilisant une méthode de prédiction.

2.2 Algorithme de base

Généralement, les algorithmes dirigés par la connectivité produisent des maillages intermédiaires de meilleure qualité d'approximation que ceux dirigés par la géométrie, en particulier à de faibles débits. Pour cette raison, notre méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion est basée sur l'algorithme d'Alliez et Desbrun [AD01a] qui est l'un des plus efficaces parmi ceux dirigés par la connectivité. Cet algorithme étend le concept des approches mono-résolution basées sur les valences [TG98, AD01b] pour la compression progressive, bénéficiant de la distribution homogène des valences de

sommets pour coder efficacement la connectivité.

Cet algorithme génère différents niveaux de détails en enlevant un ensemble de sommets indépendants à chaque itération en deux étapes : une étape de décimation et une étape de nettoyage. L'étape de décimation consiste à parcourir le maillage en le simplifiant en utilisant l'opération de l'enlèvement du sommet. Pendant le parcours, les auteurs enlèvent les sommets dont la valence est inférieure ou égale à 6 afin de maintenir la distribution des valences autour de 6. Le parcours s'effectue de patch en patch (un patch est l'ensemble de triangle autour d'un sommet), et chaque patch est traité à l'aide d'une porte qui est une arête orientée d'un patch. Lorsque le sommet opposé de la porte possède la valence inférieure ou égale à 6, ce sommet est enlevé et le polygone résultant est retriangulé. Ensuite, les autres arêtes du patch sont considérées comme de nouvelles portes et elles sont mises dans une file afin de traiter les patches adjacents. Le parcours se termine lorsque tous les patches sont traités.

La figure 2.5 illustre un exemple de l'étape de décimation sur un maillage régulier. Après avoir choisi une première porte p_0 , un sommet est enlevé. Les autres portes (p_1 à p_5) sont mises dans une file. Ensuite, une porte p_1 est retirée de la file et un autre patch est conquis. A la fin de cette étape, tous les patches sont traités et retriangulés (Figure 2.5.b). A ce stage, le maillage possède un nombre important de sommets qui ont une valence égale à 3.

Pour préserver la régularité, une étape de nettoyage est appliquée après l'étape de décimation. Cette étape procède de manière très similaire à celle de décimation, en enlevant cette fois-ci des sommets de valence 3. La figure 2.6 montre un exemple de cette étape de nettoyage. Le sommet opposé à la porte initiale p_0 est enlevé et les arêtes des triangles adjacents au patch courant (p_1 à p_4) sont entrées dans la file.

Pour un maillage régulier, l'application de ces deux étapes équivaut à une subdivision inverse $\sqrt{3}$ [Koboo], et le maillage simplifié possède également une structure régulière, comme nous montre la figure 2.7. Cette méthode se révèle très efficace pour ces maillages en termes de taux de compression de la connectivité. Par exemple, le modèle "Torus" (la figure 2.7) qui a une structure régulière ne nécessite que 0,39 bps pour la connectivité.

Pour un maillage irrégulier, cette stratégie de simplification en deux étapes permet de préserver le mieux possible la régularité tout au long des niveaux de détails de la simplification. Pour ce type de maillages, en plus des valences des sommets enlevés, des codes incidents sont nécessaires, ce qui fait augmenter le débit total.

Pour le codage de la géométrie, une quantification globale et uniforme est d'abord appliquée aux coordonnées des sommets. Ensuite la position du sommet courant est prédite à partir de la position moyenne des sommets voisins (i.e. les sommets appartenant

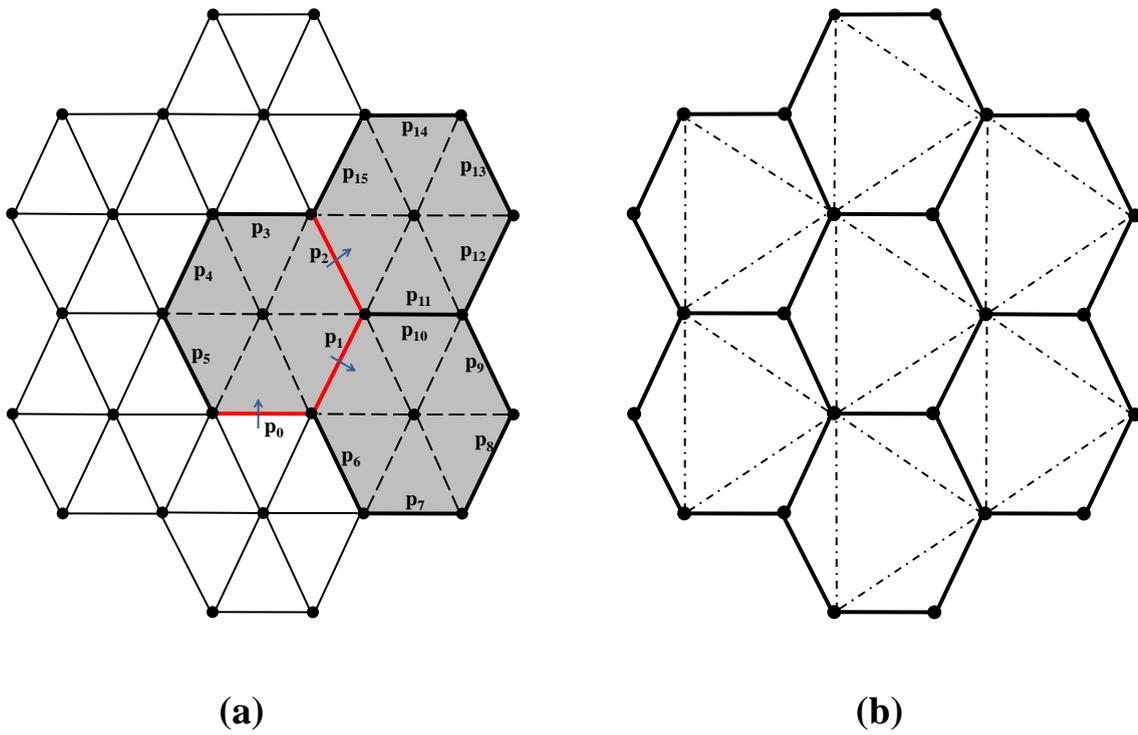


FIGURE 2.5 – Un exemple de l'étape de décimation appliquée sur un maillage régulier.

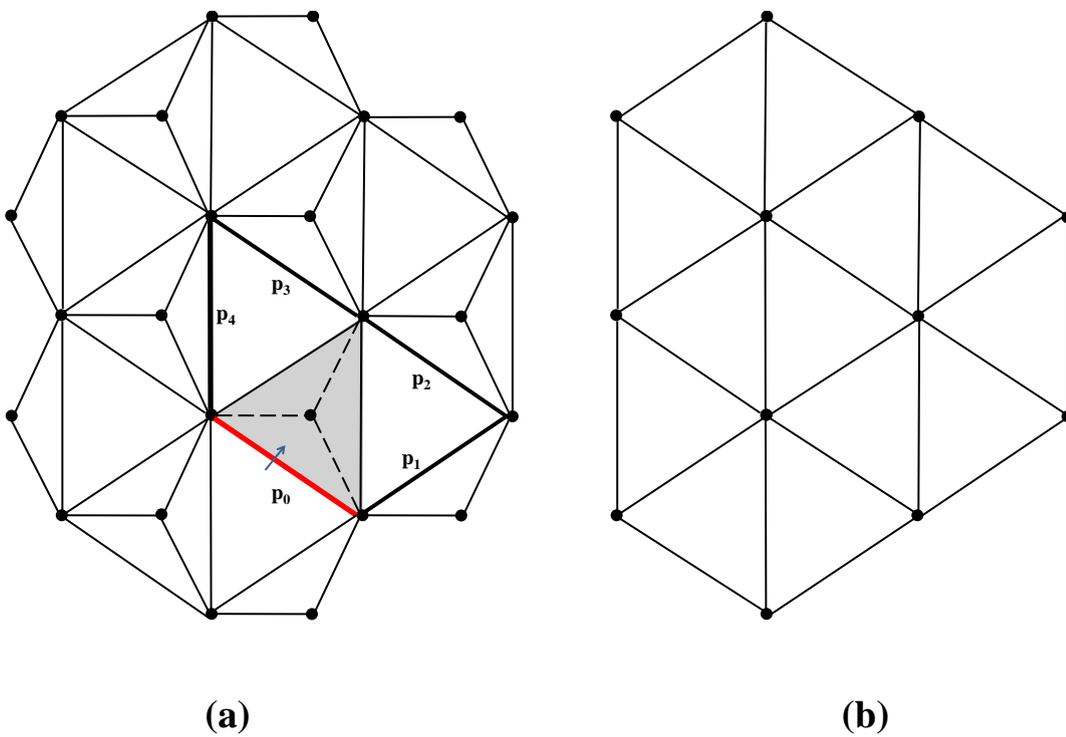


FIGURE 2.6 – Un exemple de l'étape de nettoyage. Pour un maillage régulier, le maillage résultant des étapes de décimation et de nettoyage est aussi régulier.

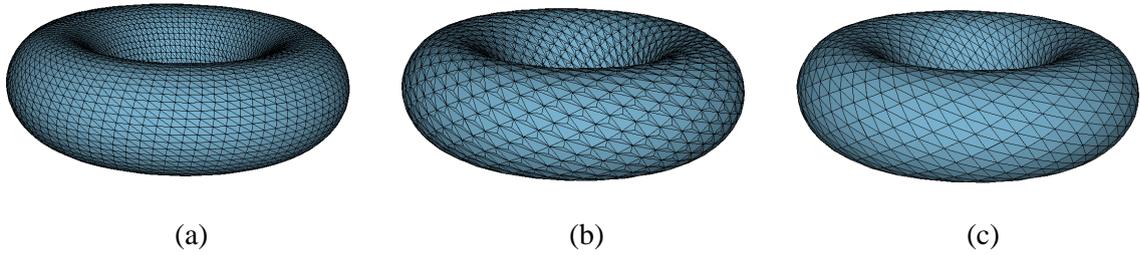


FIGURE 2.7 – Un maillage régulier (a) est simplifié par la conquête de décimation (b) et ensuite par la conquête de nettoyage (c) dans l’algorithme d’Alliez et Desbrun [AD01a]. Le maillage résultant a aussi une structure régulière.

au patch courant).

Pour réduire davantage le coût du codage géométrique, la position du sommet est représentée en composantes tangentielle et normale, en adoptant un système de coordonnées locales appelé le système de Frenet, qui est illustré dans la figure 2.8. L’utilisation de la prédiction barycentrique et du système locales de Frenet est particulièrement efficace pour des maillages possédant une surface lisse et une bonne régularité.

Pour établir ce système de Frenet, la normale approximante n de la surface locale est calculée en moyennant les normales de chaque triangles du patch. La normale n et le barycentre b définissent un plan tangent à la surface locale, et le premier vecteur tangent t_1 est obtenu en projetant la porte courante (l’arête colorée en rouge dans la figure 2.8) sur le plan tangent et en le normalisant. Le deuxième vecteur tangent t_2 est obtenu simplement par le produit vectoriel de n et de t_1 . Notons que le même barycentre et les mêmes vecteurs de base du repère de Frenet peuvent être obtenus au cours du décodage avec un coût nul, puisque le codeur et le décodeur disposent de la même configuration géométrique locale.

Pour chaque sommet à enlever V_r , sa position est exprimée dans le système de Frenet à partir du barycentre b :

$$V_r = b + \alpha \cdot t_1 + \beta \cdot t_2 + \gamma \cdot n \quad (2.1)$$

Les coordonnées (α, β, γ) représentent la position du sommet dans le nouveau repère de Frenet et elles sont codées pour chaque sommet enlevé.

2.3 Codeur géométrique

Dans cette section, nous proposons notre méthode pour le codage de la géométrie.

Dans [AD01a], à l’encodage, une étape de quantification est appliquée avant la phase

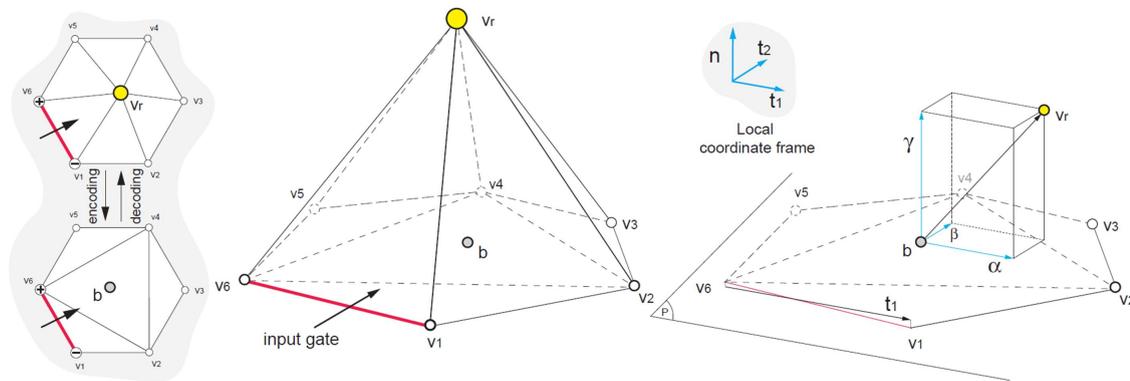


FIGURE 2.8 – Méthode de codage de la géométrie de l'algorithme [AD01a]. Image tirée de [AD01a].

de simplification itérative et les coordonnées de chaque sommet sont donc exprimées en nombres entiers dans le système cartésien. Comme détaillé précédemment, afin de réduire le coût de la géométrie, la position est représentée en composantes tangentielle et normale en adoptant le système local de Frenet. Les coordonnées de Frenet (α, β, γ) ainsi obtenues sont en général des nombres réels ; ces coordonnées ont donc besoin d'être arrondies aux entiers afin d'être codées plus efficacement.

L'utilisation de cette opération d'arrondi pour le changement du repère peut introduire une perte d'information géométrique ; plus précisément, l'opération inverse ne permet pas de restaurer la position exacte de V_r au cours de la décompression. La figure 2.9 illustre un exemple en 2D de cette perte d'information. La distance entre le sommet courant V_r et le barycentre b est initialement représentée par $(4, 4)$ dans le système cartésien (à gauche). Elle est ensuite représentée par $(1.4641, 5.4641)$ dans le repère de Frenet par une projection sur les vecteurs de base t et n . Après l'opération d'arrondi, les coordonnées $(1, 5)$ sont codées (à droite).

Pendant le décodage (figure 2.9.b), les vecteurs de base du système de Frenet et b sont établis, et les coordonnées $(1, 5)$ sont lues pour représenter V_r dans ce repère. Ce sommet est ensuite représenté dans le système initial cartésien, où la distance par rapport à b est $(3.3660, 3.8301)$. Après l'opération d'arrondi, la distance $(3, 4)$ est obtenue et on observe que la position initiale du sommet V_r n'est pas restaurée de manière exacte.

Pour pallier ce problème, les auteurs ont introduit une étape de post-quantification des coordonnées de Frenet. Cette post-quantification, qui n'est pas détaillée précisément dans le papier original, ajoute des informations supplémentaires au codeur géométrique. Notre méthode de codage géométrique consiste à éliminer cette étape de post-quantification, tout en permettant de restaurer la position exacte des sommets du maillage.

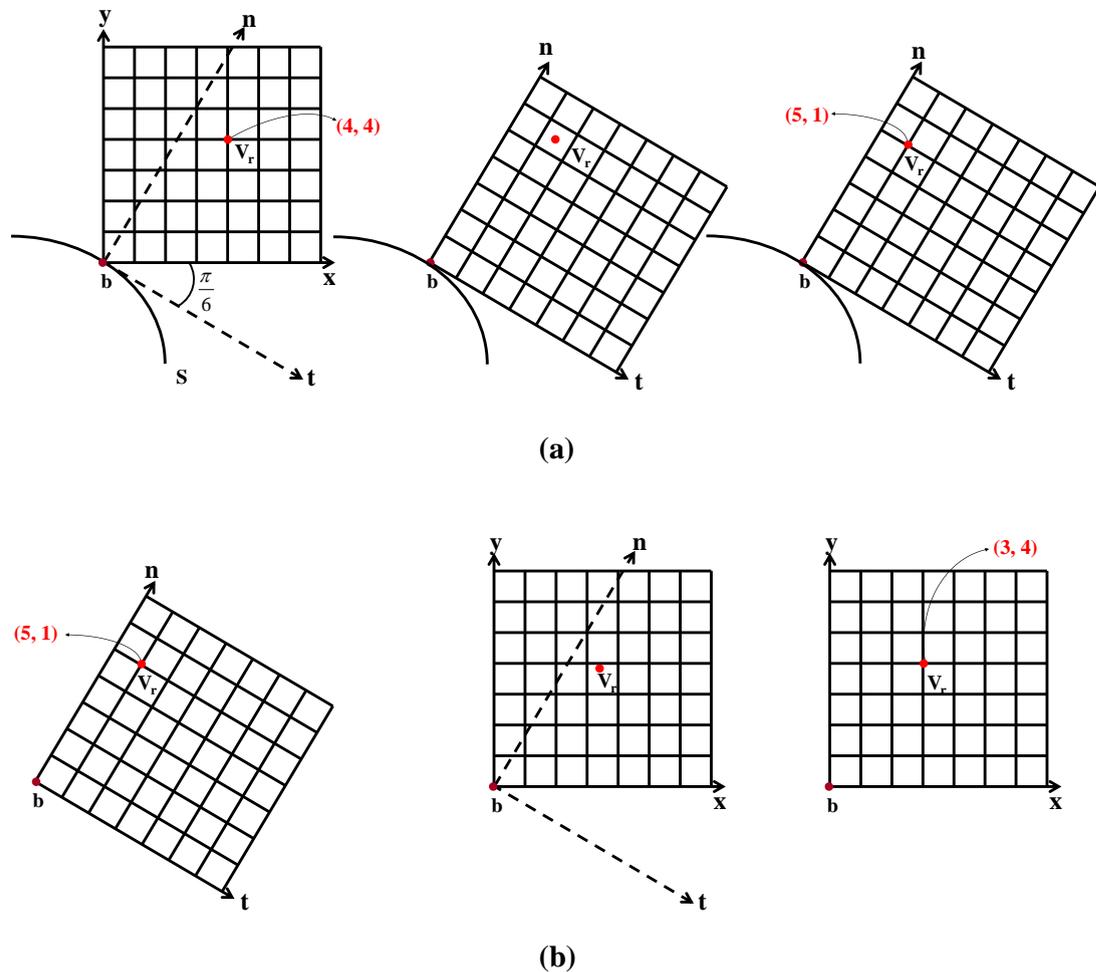


FIGURE 2.9 – Un exemple en 2D de la perte géométrique causée par l'opération d'arrondi des coordonnées de Frenet. La position du sommet V_r est représentée dans le repère de Frenet. La position initiale de ce sommet ne peut pas être restaurée de manière exacte lors de la décompression.

2.3.1 Rotation bijective en 2D

Tout d'abord, on peut remarquer que le changement du repère cartésien au repère de Frenet peut être considéré comme une opération de rotation du système autour du barycentre b . De même, le passage inverse peut être considéré comme une opération de rotation dans le sens inverse du système. Ainsi, cette post-quantification peut être supprimée si il existe une rotation bijective entre \mathbb{N}^3 et \mathbb{N}^3 .

Cartens et al. [CDTK99] ont proposé une telle bijection en 2D. Ils prouvent d'abord qu'une matrice de rotation R peut décomposée en trois matrices de cisaillement, $S_3 \cdot S_2 \cdot S_1$:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}}_R = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & \lambda_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}_{S_3} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \lambda_2 & 1 \end{pmatrix}}_{S_2} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & \lambda_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}_{S_1} \quad (2.2)$$

où θ est l'angle de rotation du système dans le sens horaire, $\lambda_1 = \lambda_3 = -\tan(\theta/2)$ et $\lambda_2 = \sin(\theta)$.

Ensuite, les auteurs prouvent que la bijection peut être obtenue en appliquant une opération d'arrondi après chaque opération de cisaillement. Plus précisément, pour le vecteur de distance D_C entre V_r et b dans le système cartésien dont les composantes sont des entiers, on obtient le vecteur correspondant D_F dans le système de Frenet par :

$$D_F = [S_1^{-1} \cdot [S_2^{-1} \cdot [S_3^{-1} \cdot D_C]]] \quad (2.3)$$

Dans cette équation, la notation $[]$ désigne une opération d'arrondi des composantes du vecteur résultant aux entiers les plus proches.

D'abord nous multiplions S_3^{-1} et D_C et nous arrondissons les composantes du vecteur résultant. Après avoir réalisé la même opération avec S_2^{-1} et S_1^{-1} , la distance D_F dans le repère de Frenet est obtenue.

Au cours de la décompression, la distance initiale D_C peut donc être obtenue de manière exacte à partir de D_F :

$$D_C = [S_3 \cdot [S_2 \cdot [S_1 \cdot D_F]]] \quad (2.4)$$

Avec cette bijection, la position initiale peut être retrouvée sans utiliser la post-quantification.

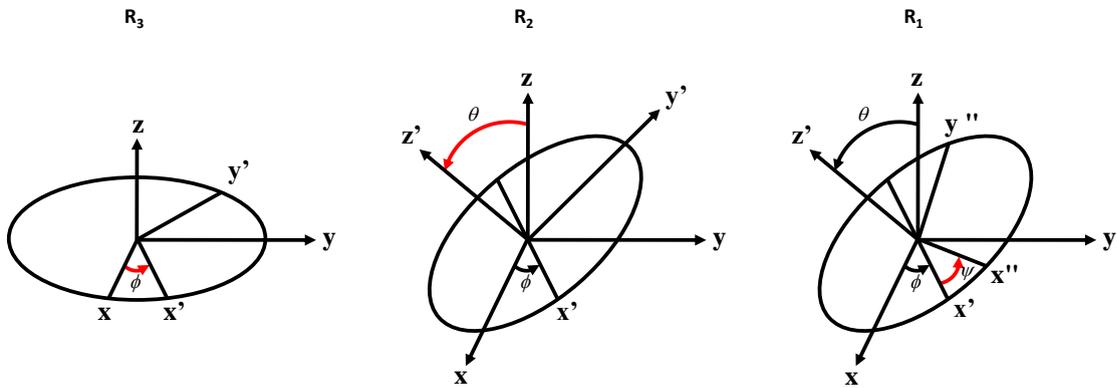


FIGURE 2.10 – La rotation dans l'espace 3D peut être décrite par 3 rotations.

2.3.2 Rotation bijective en 3D et la minimisation de l'angle de rotation

Dans [CDTK99], les auteurs montrent la bijection en 2D. Pour appliquer cette méthode pour notre cas, nous étendons cette bijection à la 3D.

La bijection permet de supprimer l'étape de post-quantification et donc d'éliminer son coût de codage. Pourtant, le codage des coordonnées obtenues par cette bijection n'est pas optimal. En effet, lorsque l'angle de rotation est important (supérieur à $\pi/4$), la différence des positions du sommet avant et après le changement de repère augmente. Ainsi l'entropie de la distribution de D_F augmente également ce qui dégrade la performance en taux de compression. Afin d'améliorer le taux de compression, nous proposons une méthode de minimisation des angles de rotation.

Avant d'introduire cette méthode, nous étudions d'abord l'opération de rotation dans l'espace tridimensionnel. La rotation dans l'espace 3D peut être décrite par 3 angles. La matrice de rotation R , qui transforme le système cartésien en système de Frenet, peut donc être décomposée en trois matrices de rotation, $R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$, comme nous montre la figure 2.10.

1. R_3 : première rotation avec un angle ϕ autour de l'axe z ,
2. R_2 : deuxième rotation avec un angle θ autour de l'axe x' et
3. R_1 : dernière rotation avec un angle ψ autour de l'axe z' .

Les vecteurs x'' , y'' , z' forment les vecteurs de base du nouveau système après rotation. Dans notre cas, ces trois vecteurs correspondent aux vecteurs de base du système

de Frenet t_1, t_2, n , et la matrice de rotation R est :

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 = \begin{pmatrix} t_{1x} & t_{2x} & n_x \\ t_{1y} & t_{2y} & n_y \\ t_{1z} & t_{2z} & n_z \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

A ce stade, nous connaissons la matrice R et afin de pouvoir effectuer la bijection, nous devons calculer les trois angles de rotation des matrices R_1, R_2 et R_3 à partir de R . Pour ce calcul, nous étudions les rotations inverses R_1^{-1}, R_2^{-1} et R_3^{-1} . Ces opérations appliquées dans l'ordre permettent de transformer le repère de Frenet en repère cartésien. En même temps, nous réduisons l'angle de chaque rotation pour améliorer le taux de compression.

Le premier angle de rotation ψ peut être obtenu en calculant l'opération inverse de rotation R_1 . L'opération de rotation R^{-1} consiste à tourner autour de l'axe z'' (voir la figure 2.10) avec ψ dans le sens opposé que R_1 jusqu'à ce que $t_{1z} = 0$.

La figure 2.11 illustre notre stratégie pour minimiser l'angle de rotation. Le cas idéal correspond au cas 1 dans cette figure où la valeur absolue de l'angle $|\psi|$ est inférieure à $\pi/4$. Si $|\psi|$ est supérieur à $\pi/4$ (cas 2 ou cas 3), nous permutons t_1 et t_2 pour que $|\psi|$ soit inférieur à $\pi/4$ (figure 2.11.c). A ce stade, $|\psi|$ peut être plus grand que $\pi/2$ (cas 3) : dans ce cas nous changeons le sens des vecteurs t_1 et t_2 (figure 2.11.f).

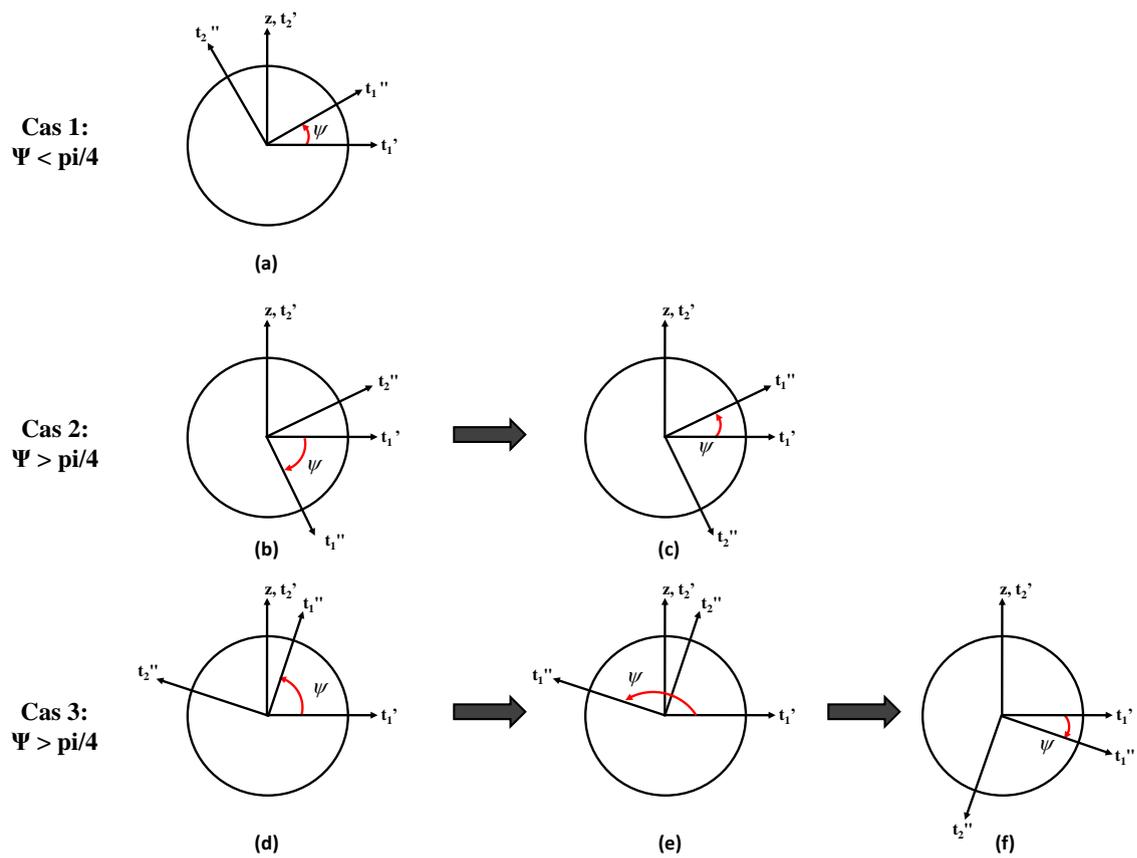
Tout d'abord, nous avons besoin de vérifier si la valeur absolue de l'angle ψ est supérieure à $\pi/4$. Cette vérification est possible en comparant t_{1z} et t_{2z} :

$$|\psi| = \begin{cases} < \pi/4 & , \text{ si } |t_{1z}| < |t_{2z}| \\ \geq \pi/4 & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (2.6)$$

Suivant la valeur de $|\psi|$, on a besoin de permuter les vecteurs t_1 et t_2 . Pour cela nous introduisons une matrice S_0 qui est définie par :

$$S_0 = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & , \text{ si } \psi < \pi/4 \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (2.7)$$

Afin de prendre en compte cette permutation, nous multiplions la matrice S_0 à R et

FIGURE 2.11 – Méthode de minimisation de l'angle ψ .

R devient $R \cdot S_0$.

Maintenant, nous avons besoin de vérifier si $|\psi|$ est plus grand que $\pi/2$. Cette vérification est possible en observant le signe de t_{2z} . Si le signe est négatif, nous devons changer le sens des vecteurs t_{1z} et t_{2z} . Pour cela, nous utilisons la matrice S_1 :

$$S_1 = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & , \text{ si } t_{2z} \geq 0 \\ \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (2.8)$$

Ce changement de sens de vecteur est pris en compte en multipliant R par S_1 . R devient $R \cdot S_1$. A ce stade, l'angle de rotation est toujours inférieur à $\pi/4$, et cet angle peut être obtenu :

$$\psi = \begin{cases} 0 & , \text{ si } \sqrt{t_{1z}^2 + t_{2z}^2} = 0 \\ -\text{signe}(t_{1z}) \cdot \cos^{-1}\left(\frac{t_{2z}}{\sqrt{t_{1z}^2 + t_{2z}^2}}\right) & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (2.9)$$

Cet angle permet de définir la matrice de rotation R_1 et comme mentionné précédemment, R_1 équivaut à une combinaison de 3 matrices de cisaillement S_2 , S_3 et S_4 :

$$\begin{aligned} R_1 &= \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -\tan(\frac{\psi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{S_2} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \sin(\psi) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{S_3} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -\tan(\frac{\psi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{S_4} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Nous effectuons la rotation inverse de R_1 en multipliant la matrice R_1^{-1} à R .

L'étape suivante est de minimiser l'angle θ de la deuxième rotation R_2 . L'opération inverse R_2^{-1} consiste à tourner autour de l'axe x' avec un angle θ jusqu'à ce que $t_{2z} = 0$. Nous vérifions d'abord si $|\theta|$ est supérieur à $\pi/4$, en comparant t_{2z} et n_z .

$$|\theta| = \begin{cases} < \pi/4 & , \text{ si } |t_{2z}| < |n_z| \\ \geq \pi/4 & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (2.11)$$

Si la valeur absolue de θ est supérieure à $\pi/4$, nous avons besoin de permuter les vecteurs t_2 et n . Pour cette permutation, la matrice S_5 est utilisée :

$$S_5 = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} , & \text{si } \theta < \pi/4 \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} , & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.12)$$

Nous multiplions R par S_5 afin de prendre l'effet de cette permutation.

A ce stade, on a besoin de vérifier si $|\theta|$ est supérieur à $\pi/2$, en observant le signe de n_z . Suivant la valeur de l'angle, nous changeons le sens des vecteurs t_2 et n , en utilisant la matrice S_6 :

$$S_6 = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} , & \text{si } n_z \geq 0 \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} , & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.13)$$

Après avoir multiplié R par S_6 , l'angle θ peut être obtenu par :

$$\theta = \begin{cases} 0 & , \text{ si } \sqrt{t_{2y}^2 + n_z^2} = 0 \\ -\text{signe}(t_{2z}) \cdot \cos^{-1}\left(\frac{n_z}{\sqrt{t_{2z}^2 + n_z^2}}\right) & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (2.14)$$

Nous pouvons établir la matrice R_2 avec cet angle, qui équivaut à une combinaison de trois matrices de cisaillement S_7 , S_8 et S_9 :

$$\begin{aligned}
R_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \\
&= \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\tan(\theta/2) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{S_7} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & 1 \end{pmatrix}}_{S_8} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\tan(\theta/2) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{S_9} \quad (2.15)
\end{aligned}$$

Nous effectuons la rotation inverse de R_2 en multipliant la matrice R_2^{-1} à R .

L'étape suivante est de minimiser l'angle ϕ de la troisième rotation R_3 . Nous vérifions d'abord si $|\phi|$ est supérieur à $\pi/4$, en comparant t_{1y} et t_{2y} .

$$|\phi| = \begin{cases} < \pi/4 & , \text{ si } |t_{1y}| < |t_{2y}| \\ \geq \pi/4 & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (2.16)$$

Si la valeur absolue de ϕ est supérieure à $\pi/4$, nous avons besoin de permuter les vecteurs t_1 et t_2 . Pour cette permutation, la matrice S_{10} est utilisée :

$$S_{10} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & , \text{ si } \phi < \pi/4 \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (2.17)$$

Nous multiplions R par S_{10} afin de prendre l'effet de cette permutation.

A ce stade, on a besoin de vérifier si $|\phi|$ est supérieur à $\pi/2$, en observant le signe de t_{2y} . Suivant la valeur de l'angle, nous changeons le sens des vecteurs t_1 et t_2 , en utilisant

la matrice S_{11} :

$$S_{11} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & , \text{ si } t_{2y} \geq 0 \\ \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (2.18)$$

Après avoir multiplié R par S_{11} , l'angle ϕ peut être obtenu par :

$$\phi = \begin{cases} 0 & , \text{ si } \sqrt{t_{1y}^2 + t_{2y}^2} = 0 \\ -\text{signe}(t_{1y}) \cdot \cos^{-1}\left(\frac{t_{2y}}{\sqrt{t_{1y}^2 + t_{2y}^2}}\right) & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (2.19)$$

Nous pouvons établir la matrice R_3 avec cet angle, qui équivaut à une combinaison de trois matrices de cisaillement S_{12} , S_{13} et S_{14} :

$$\begin{aligned} R_3 &= \begin{pmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -\tan(\frac{\phi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{S_{12}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{S_{13}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -\tan(\frac{\phi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{S_{14}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

A ce stade, nous pouvons obtenir le vecteur de distance D_F par rapport à b dans le repère de Frenet à partir de la distance D_C dans le système cartésien par :

$$D_F = [S_0^{-1} \cdot [S_1^{-1} \cdots [S_{13}^{-1} \cdot [S_{14}^{-1} \cdot D_C]] \cdots]] \quad (2.21)$$

Pendant l'encodage, nous encodons D_F pour chaque sommet enlevé.

Au cours de la décompression, les mêmes matrices S_i peuvent être obtenues de manière déterministe, et la position exacte du sommet dans le système cartésien peut être restaurée en tant que la distance D_C par rapport à b :

$$D_C = [S_{14} \cdot [S_{13} \cdots [S_1 \cdot [S_0 \cdot D_F]] \cdots]] \quad (2.22)$$

Dans cette méthode, nous avons besoin d'inverser 15 matrices pour coder la position

TABLEAU 2.1 – Comparaison du taux de compression de la géométrie. Chiffres sont en bps (bits par sommet).

Modèle	#S	AD 2001	Méthode proposée (B)	Méthode proposée (BA)
Tiger	2 738	12,7	12,1	11,7
Mannequin	11 703	10,0	9,8	9,3
Venusbody	11 362	10,2	8,6	8,1
Torus	36450	3,6	3,0	2,8

de chaque sommet, ce qui peut nécessiter un temps de calcul très important. Heureusement, nous pouvons diminuer significativement la complexité en temps, puisque l'inverse de la matrice de rotation est simplement le changement de signe de l'angle. De plus, les matrices utilisées pour la minimisation des angles de rotation, S_0 , S_1 , S_5 , S_6 , S_{10} et S_{11} sont inchangées même si on les inverse.

Le tableau 2.1 liste les taux de compression de la géométrie de notre méthode basée uniquement sur la bijection (B) et et notre méthode utilisant la bijection et l'optimisation de l'angle (BA), comparé aux résultats de l'algorithme original d'Alliez et Desbrun (AD 2001) [AD01a]. Notre méthode basée uniquement sur la bijection (B) nous a permis de supprimer l'étape de post-quantification de l'algorithme original. Cette méthode est très similaire à notre méthode (BA) sauf que les matrices de minimisation d'angle (S_0 , S_1 , S_5 , S_6 , S_{10} et S_{11}) ne sont pas appliquées dans l'équation 2.21. Nous montrons que la bijection nous a permis de réduire le coût de la géométrie par rapport à AD 2001 (le gain est 9,8 % en moyenne pour les modèles dans le tableau 2.1) et l'optimisation de l'angle apporte un gain supplémentaire (le gain est 14,4 % en moyenne).

Dans cette section, nous avons présenté notre codeur géométrique basée sur la rotation bijective et la minimisation des angles de rotation. Nous proposons dans la section suivante notre stratégie d'optimiser la performance débit-distorsion.

2.4 Optimisation du compromis débit-distorsion

Dans la section précédente, nous avons introduit un codeur géométrique pour réduire le coût de codage. Dans cette section, nous nous intéressons à l'optimisation du compromis débit-distorsion.

Notre méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion consiste à adapter la précision de la quantification à la complexité et au nombre des éléments de chaque maillage intermédiaire.

Généralement la précision de la quantification initiale est conservée dans tous les niveaux intermédiaires dans les méthodes classiques dirigées par la connectivité. Cette

haute précision est nécessaire pour les maillages intermédiaires de résolutions élevées possédant un nombre important d'éléments. Par contre, cette précision n'est pas nécessaire pour des maillages grossiers, qui sont constitués de peu d'éléments.

Dans la figure 2.12, nous avons réduit la précision de quantification de 12 bits à 6 bits pour le modèle "Rabbit". Lorsque nous avons appliqué cette réduction au modèle original qui est composé de 67039 sommets (ligne du haut), nous observons une forte déformation en termes de qualité visuelle et aussi en termes d'erreur géométrique. Pourtant, cette réduction de quantification n'entraîne pas une déformation sérieuse pour le modèle grossier (ligne du bas). Dans cette figure, l'erreur géométrique est mesurée en termes de moyenne quadratique (*root mean square (RMS)* en anglais) normalisée par la boîte englobante en utilisant METRO [CRS98].

Cette observation démontre que la précision de quantification de chaque maillage peut être adaptée à sa complexité sans dégrader de façon significative la qualité géométrique. La quantification étant étroitement liée au taux de compression, l'adaptation de la quantification permet d'optimiser le compromis débit-distorsion.

La figure 2.13 décrit le principe de notre algorithme, comparé aux méthodes classiques dirigées par la connectivité. Dans les algorithmes traditionnels, au codage, le maillage initial M_n^Q , qui est quantifié avec Q bits, est simplifié successivement. Après n itérations de simplification, le maillage de base M_0^Q est obtenu, et la précision initiale de quantification est conservée. Dans notre travail, nous appliquons aussi des opérations de réduction de la précision de quantification. Plus concrètement, notre objectif est de trouver un chemin optimal en combinant des opérations de simplification et des opérations de réduction de précision de quantification, permettant d'optimiser au mieux la performance débit-distorsion.

Pour réaliser cette optimisation du compromis débit-distorsion, deux problèmes principaux doivent être résolus :

1. La précision de quantification doit être adaptée à chaque niveau de résolution. Pour cela, à chaque itération, le choix de la prochaine opération entre la décimation et la réduction de précision de quantification doit être déterminée de façon optimale.
2. La réduction de la précision de quantification doit être aussi efficacement codée, afin d'éviter une augmentation significative du taux de compression.

Notons que toutes ces opérations sont appliquées lors de l'encodage.

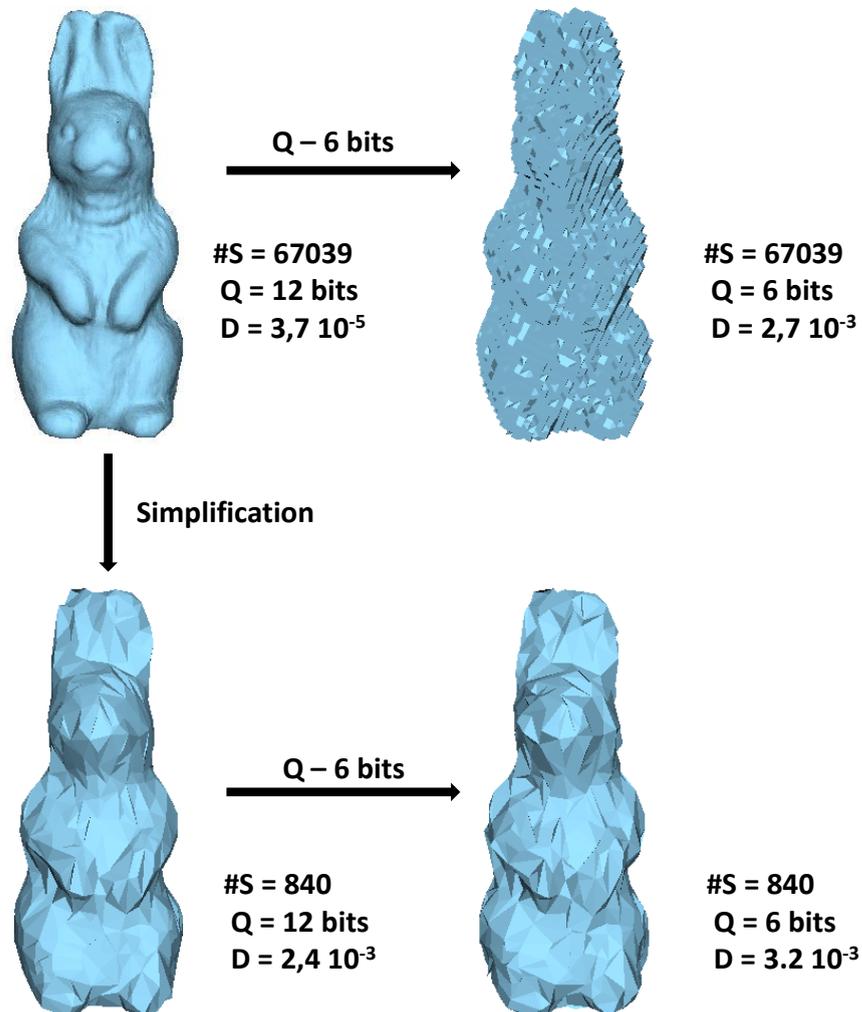


FIGURE 2.12 – Comparaison de distorsion du modèle "Rabbit" sous différentes précisions de quantification et à différents niveaux de résolutions. #S, Q et D désignent respectivement le nombre de sommets, les bits de quantification et l'erreur géométrique.

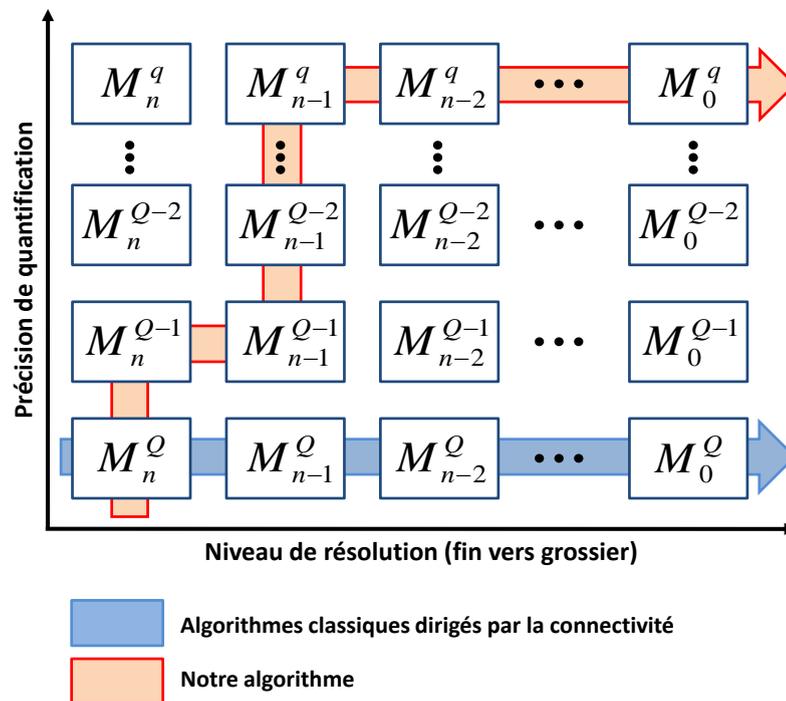


FIGURE 2.13 – Notre algorithme (flèche rouge) réduit la précision de quantification au cours de l’encodage contrairement aux méthodes classiques.

2.4.1 Changement de la précision de quantification

Nous proposons dans cette section une méthode pour réduire la précision de quantification et pour coder efficacement l’opération inverse.

La quantification initiale utilisant Q bits consiste à diviser la boîte englobante du maillage en entrée en $2^Q \times 2^Q \times 2^Q$ cellules cubiques, et à déplacer chaque sommet au centre de la cellule correspondante. Lorsque Q est réduit à $Q - 1$, la dimension de chaque cellule doit s’agrandir deux fois le long des trois axes et chaque sommet doit être déplacé vers le centre de la nouvelle cellule qui est plus grande.

La réduction de la précision de quantification peut donc être considérée comme une opération de fusion dans une structure d’octree comme nous le montre la figure 2.14; chaque groupe de huit cellules-filles (cellules initiales) est fusionné pour former une cellule-mère (nouvelle cellule plus grande). Pendant le processus de décodage, l’opération inverse est effectuée en divisant chaque cellule en 8 cellules-filles afin d’augmenter la précision de quantification. Le décodeur a besoin de connaître la position originale de chaque sommet; ainsi pour chaque sommet, l’indice de la cellule-fille correspondante parmi 8 est codé.

Sans aucune méthode de prédiction, chaque déplacement de sommet nécessite 3 bits, puisqu’un indice parmi huit possibilités est à coder (huit cellules-filles sont fusionnées

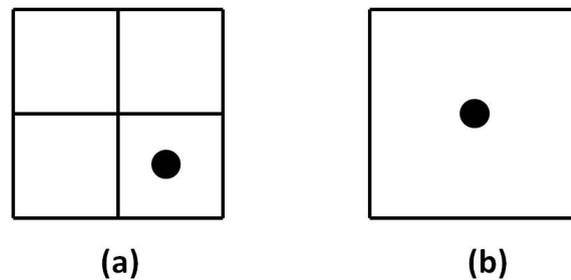


FIGURE 2.14 – Pendant l’encodage, les cellules-filles (a) sont fusionnées pour former une cellule-mère (b). Le sommet est déplacé au centre et l’indice de la cellule-fille est codé.

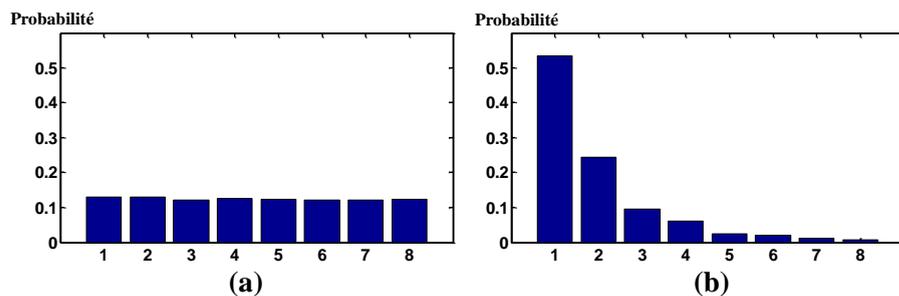


FIGURE 2.15 – L’histogramme des indices des cellules-filles avant (a) et après (b) la réorganisation des indices par le calcul de la priorité.

en une cellule-mère). Pour réduire ce coût important, nous adoptons la méthode de prédiction de Peng et Kuo [PK05], qui permet de réduire l’entropie des indices. Pour chaque cellule-fille, une valeur de priorité est calculée en utilisant la localisation et la distance des sommets voisins. Ensuite, les indices des cellules-filles sont réordonnés suivant ces valeurs de priorité. Lors de la fusion, le nouvel indice correspondant à la cellule-fille d’origine est codé. Cette méthode de prédiction permet de réduire efficacement le débit nécessaire pour le codage de l’augmentation de la précision de quantification. La figure 2.15 montre l’histogramme des indices des cellules-filles avant et après la réorganisation des indices. Dans cette figure, la précision de quantification du niveau le plus fin du modèle "Venusbody" (11362 sommets) est réduite de 10 bits à 9 bits. L’utilisation de la prédiction permet d’encoder l’augmentation de précision de chaque sommet avec 1,92 bits au lieu de 3 bits pour cet exemple.

2.4.2 Détermination optimale de la précision de quantification

Durant l’encodage, comme nous le montre la figure 2.13, un maillage intermédiaire M_i^j peut subir une décimation qui conduit à M_{i-1}^j , ou une diminution de la précision de quantification qui conduit à M_i^{j-1} , et nous devons choisir l’opération qui améliore le plus la performance débit-distorsion. La détermination de la prochaine opération à

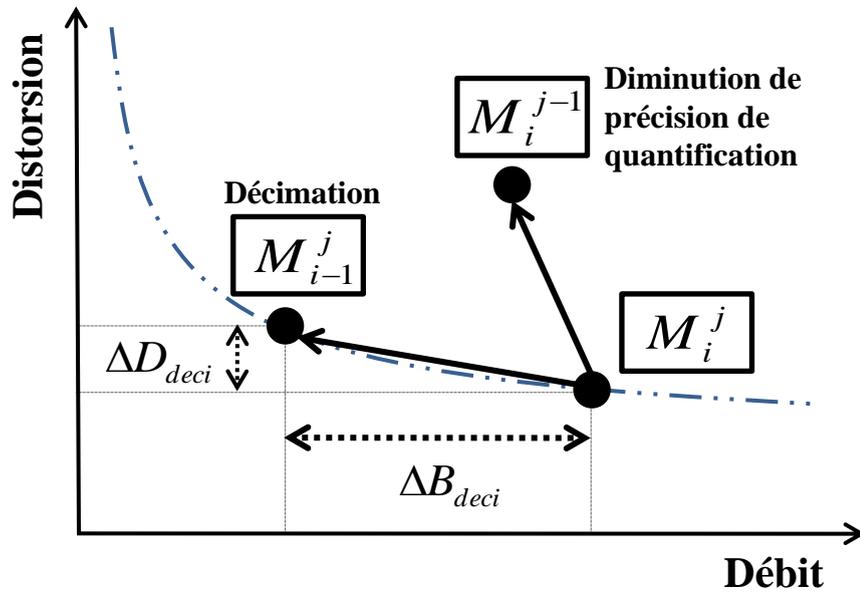


FIGURE 2.16 – Choix de la meilleure opération à effectuer : décimation ou diminution de précision de quantification.

chaque itération est l'enjeu principal dans notre méthode.

Pour déterminer la meilleure opération de manière optimale et automatique, nous calculons l'erreur géométrique ΔD par rapport au maillage original M_n^Q , et la quantité de bits nécessaires ΔB pour coder l'opération inverse, pour les deux opérations possibles. Dans le cas de la décimation, nous obtenons ΔB_{deci} en calculant l'entropie des informations de connectivité et de géométrie. L'erreur géométrique ΔD_{deci} est obtenue en mesurant l'erreur géométrique du maillage décimé par rapport au maillage original. Dans le cas de la réduction de la précision de quantification, ΔB_{quan} est obtenue en évaluant l'entropie des indices des cellules-filles (section 2.4.1), et ΔD_{quan} est obtenue de façon similaire à ΔD_{deci} . Puis, les rapports $\frac{\Delta D_{deci}}{\Delta B_{deci}}$ et $\frac{\Delta D_{quan}}{\Delta B_{quan}}$ sont comparés et l'opération dont la valeur de rapport est la plus petite est choisie, puisque cette opération optimise localement le compromis débit-distorsion.

Cette sélection automatique de la prochaine opération est décrite dans la figure 2.16. Dans cet exemple, la décimation est choisie comme la prochaine opération.

Notre méthode optimale permet d'améliorer la performance débit-distorsion comme nous le montre la figure 2.17. Pour un même débit notre méthode produit un modèle dont l'erreur géométrique est plus faible ($D = 2,1 \cdot 10^{-3}$) que la méthode d'Alliez et Desbrun ($D = 3,9 \cdot 10^{-3}$) et la méthode Peng et Kuo ($D = 3,9 \cdot 10^{-3}$). Notre méthode permet d'adapter la quantification pour ce niveau de détails (7 bits contre 12 bits de la méthode d'Alliez et Desbrun) pour un même débit, et on a pu transmettre plus de

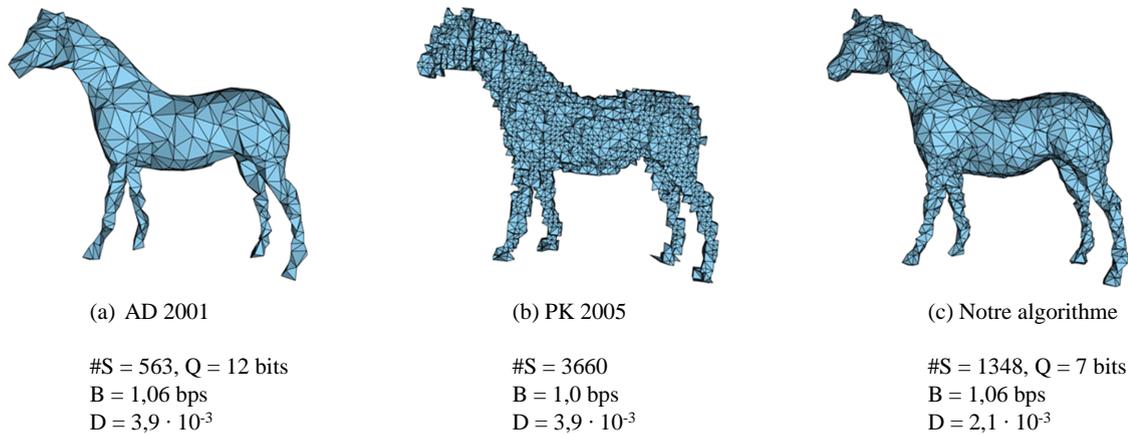


FIGURE 2.17 – Résultats du modèle "Horse" obtenus par différentes approches à des débits similaires : Alliez et Desbrun (AD 2001) [AD01a], Peng et Kuo (PK 2005) [PK05] et notre algorithme.

sommets. Nous pouvons également observer sur cette figure le problème des méthodes basée géométrie, qui produisent des artefacts dans les basses résolutions.

Notons que dans notre méthode de détermination optimale, l'erreur géométrique est mesurée en termes de moyenne quadratique (*root mean square (RMS)* en anglais) en utilisant METRO [CRS98]. Néanmoins, d'autres distances telles que Hausdorff, ou n'importe quelle métrique définie par l'utilisateur peuvent être employées.

2.4.3 Détermination quasi-optimale de la précision de quantification

La méthode optimale permet d'adapter la précision de quantification pour chaque niveau de détails, en augmentant la performance débit-distorsion. Cependant, cette approche basée sur la détermination optimale de la prochaine opération possède un inconvénient qui limite son efficacité : un temps de calcul important. En effet, à chaque itération, cette approche a besoin de mesurer l'erreur géométrique du modèle obtenu par la décimation et du modèle obtenu par la réduction de la précision de quantification. Cette mesure de distorsion est en général très coûteuse en temps ; pour le modèle "Rabbit" qui possède 67 039 sommets, cette approche demande 662 secondes alors que 1 seconde suffisent lorsque la diminution de la précision de quantification n'est pas effectuée.

Dans notre méthode de détermination optimale, la précision optimale de quantification pour chaque maillage intermédiaire est déterminée en sélectionnant à chaque itération la meilleure opération qui optimise localement le compromis débit-distorsion. Notre stratégie pour réduire le temps de calcul est de déterminer la prochaine opération en évaluant une précision quasi-optimale de quantification par une mesure de la com-

plexité géométrique de chaque maillage intermédiaire. Plus précisément si la précision de quantification estimée est inférieure à la précision courante, la réduction de la précision de quantification est choisie pour la prochaine opération, sinon la décimation est sélectionnée.

La nouvelle méthode de détermination appelée quasi-optimale consiste à retrouver le chemin parcouru par notre méthode précédente (figure 2.13) de manière le plus similaire possible, en se basant sur une analyse de la complexité géométrique de chaque maillage intermédiaire et sur un processus d'apprentissage.

Bien que la décision de l'opération suivante (décimation ou diminution de précision de quantification) soit prise localement à chaque itération, nous observons que notre approche basée sur la détermination optimale adapte globalement la précision de quantification à la complexité des maillages intermédiaires. Dans la figure 2.18, le chemin bleu est obtenu en appliquant notre méthode optimale sur le modèle "Bimba" avec une quantification initiale de 9 bits. Si une quantification initiale plus précise (par exemple 12 bits) est appliquée, une série de diminutions de précision de quantification est effectuée (chemin rouge dans la figure 2.18) jusqu'à rejoindre le chemin bleu, ensuite le chemin restant est identique. Au contraire, si une quantification initiale moins précise (par exemple 6 bits) est appliquée, une série de décimations est réalisée (chemin vert dans la figure 2.18) jusqu'à rejoindre le chemin bleu et le chemin restant est aussi identique.

Cette observation montre que la précision optimale est de 9 bits pour le niveau n , elle est de 8 bits pour le niveau $n - 1$, etc. et que le chemin optimal est unique. Autrement dit pour chaque maillage intermédiaire, il existe une unique précision optimale. Notre méthode quasi-optimale va donc chercher à estimer cette précision de quantification adaptée à chaque maillage intermédiaire en analysant ses caractéristiques géométriques, par le biais d'une mesure de complexité, définie ci-dessous.

Nous considérons tout d'abord le nombre de sommets du maillage courant pour estimer la précision appropriée de quantification, puisqu'elle doit être plus précise lorsque le nombre d'éléments augmente afin d'éviter le problème d'*aliasing*. Nous considérons également le degré de complexité géométrique, puisqu'une quantification plus précise est nécessaire pour des surfaces plus complexes. Ce degré de complexité de forme est évalué par le rapport entre le volume de la boîte englobante et l'aire de la surface ; pour un même volume, plus l'aire de la surface augmente, plus la complexité est importante.

En conséquence, notre mesure de complexité géométrique K_G est basée sur le volume

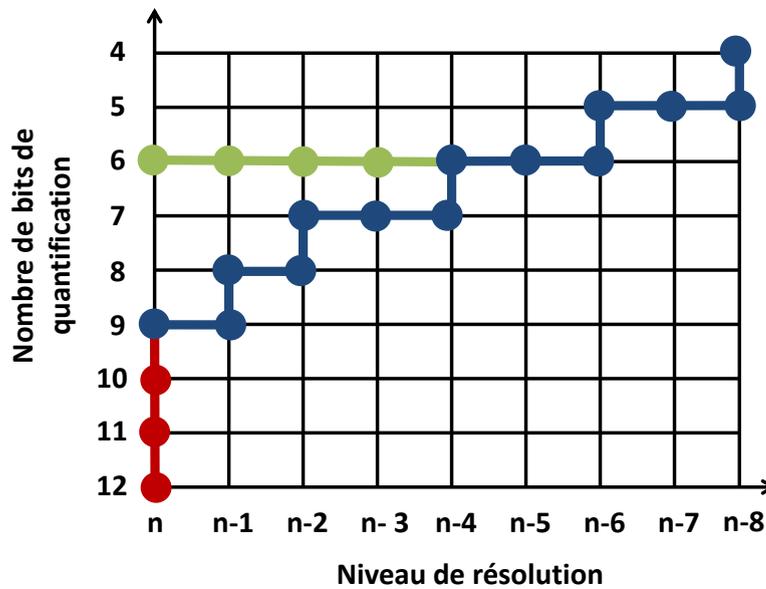


FIGURE 2.18 – Les chemins parcourus en utilisant des nombres de bits différents de quantification sur le modèle "Bimba".

de la boîte englobante, l’aire de la surface et le nombre de sommets :

$$K_G = \frac{\text{Volume de la boîte englobante}}{\text{aire de la surface} \otimes \text{nombre de sommets}} \tag{2.23}$$

Pour la cohérence, la géométrie du maillage en entrée est ajustée pour que la plus grande dimension de la boîte englobante soit égale à 10, l’aire de la surface étant obtenue en sommant l’aire de tous les triangles. Cette mesure va nous servir à estimer la précision de quantification optimale pour chaque maillage intermédiaire.

Dans la figure 2.19, nous illustrons les précisions optimales de quantification, obtenues en appliquant notre méthode de détermination optimale, en fonction des valeurs correspondantes de K_G , pour 6 maillages de référence. Au total, 93 points sont acquis et ces points nous servent de base d’apprentissage pour établir une équation qui permet d’estimer la précision optimale de quantification q_G . Pour cela, nous appliquons un ajustement de type logarithmique sur ces données et nous obtenons :

$$q_G = [a \cdot \log(K_G) + b] \tag{2.24}$$

Dans cette équation, $[]$ désigne l’opération d’arrondi à l’entier le plus proche, $a = -1.248$ et $b = -0.954$.

Au cours de l’encodage, notre méthode de détermination quasi-optimale calcule la précision optimale estimée q_G . Si la précision courante Q_G est inférieure à q_G , la diminution de la précision de quantification est choisie comme l’opération suivante, sinon,

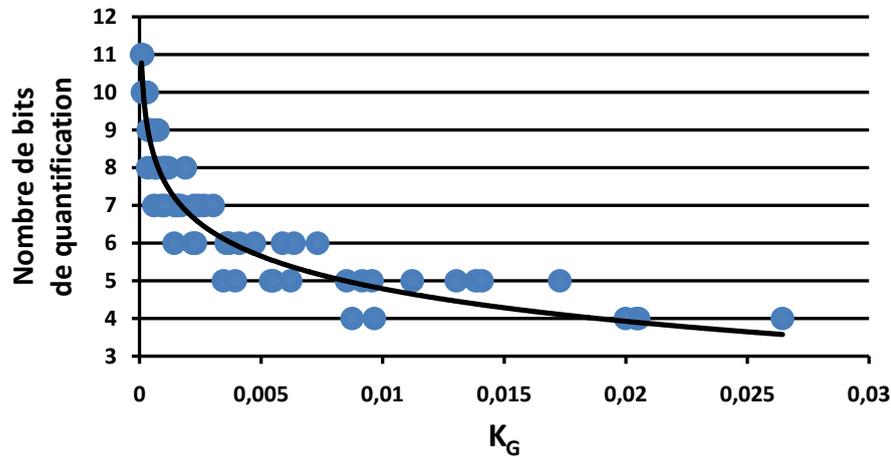


FIGURE 2.19 – Précision optimale de quantification en fonction de K_G obtenu sur des niveaux intermédiaires des différents modèles.

la décimation est effectuée.

Dans cette section, nous avons présenté une méthode d’optimisation du compromis débit-distorsion qui se base sur l’adaptation de quantification. Dans la section suivante, nous allons présenter et analyser les résultats de notre méthode.

2.5 Résultats expérimentaux

Dans cette section, nous présentons les résultats expérimentaux de la méthode proposée dans ce chapitre, en la comparant avec la méthode originale d’Alliez et Desbrun (AD 2001) [AD01a], la méthode basée sur la décomposition en octree de Peng et Kuo (PK 2005) [PK05], la méthode Wavemesh de Valette et Prost (VP 2004) [VP04], la méthode IPR de Valette et al. (VCP 2009) [VCP09], la méthode de Mamou et al. (MDCG 2010) [MDCG10] et la méthode de Peng et al. (PHKEG 2010) [PHK*10].

2.5.1 Taux de compression sans perte

Le tableau 2.2 nous donne les taux de compression sans pertes des diverses méthodes appliquées sur des différents maillages de référence en utilisant une quantification de 10 ou 12 bits.

Notons que parmi les débits de AD 2001, ceux qui sont marqués avec ‘*’ sont extraits de l’article original [AD01a], tandis que des autres sont obtenus en utilisant notre propre implémentation de cette méthode, qui produit des résultats similaires.

Dans ce tableau, les débits de la méthode proposée sans AQ (adaptation de quan-

TABLEAU 2.2 – Comparaison du taux de compression. Chiffres en bps (bits par sommet).

Modèle	#S	Q	PK 2005	VP 2004	VCP 2009	AD 2001	Codeur proposé sans AQ	Codeur proposé avec AQ
Fandisk	6 475	10	13,3	13,5	12,4	17,4*	15,6	16,1
Venusbody	11 362	10		11,4		14,1	11,7	12,0
Horse	19 851	12	16,6	19,8	18,2	20,9*	20,3	20,6
Torus	36 450	12	11,8	8,9	13,6	5,8	4,8	5,7
Torus	36 450	10				4,0	3,0	3,2
Mannequin	11 703	10		12,3		13,6*	13,0	13,1
Tiger	2 738	10		14,1		15,5*	14,0	14,3
Rabbit	67 039	12	14,8	15,6	13,6	17,6	16,2	16,4
Venushead	8 286	10		20,6		19,5	18,1	18,2
Dinosaur	14 070	10				18,5	15,2	15,6
Foot	10 016	12				25,8	21,7	21,8

tification) sont des résultats obtenus en utilisant le nouveau codeur géométrique sans adaptation de quantification, et ceux de la méthode proposée avec AQ comprennent aussi le coût nécessaire pour l'adaptation de quantification.

Tout d'abord, on observe que le nouveau codeur géométrique permet de réduire le taux total de compression (connectivité et géométrie) par rapport à l'algorithme original [AD01a]. Le gain se situe entre 2,9% et 25,0% (12,3% en moyenne pour les maillages du tableau 2.2). On peut observer également que l'adaptation de la précision de quantification nécessite un surcoût de codage. Néanmoins, pour la plupart des maillages testés, l'augmentation du débit est très faible, et les résultats sont toujours meilleurs que AD 2001. Toutefois, les méthodes PK 2005 et VCP 2009 donnent souvent des meilleurs résultats que notre algorithme dans le cadre sans pertes.

2.5.2 Performance débit-distorsion

Les figures 2.20 et 2.21 montrent respectivement les résultats de débit-distorsion des modèles "Venusbody" et "Venushead". Le modèle "Venusbody" est quantifié initialement en utilisant 12 bits et le modèle "Venushead" est quantifié avec 10 bits. Le débit est exprimé en bits par sommet et la distorsion est exprimée en maximum de deux distances RMS (mesures dans les deux sens) normalisé par la boîte englobante. Dans ces figures, nous comparons notre méthode optimale et notre méthode quasi-optimale avec celle d'Alliez et Desbrun [AD01a]. La méthode optimale donne des meilleurs résultats en termes de débit-distorsion que [AD01a], et notre méthode quasi-optimale produit des résultats similaires. Notons que les modèles "Venusbody" et "Venushead" n'appartiennent pas à la base d'apprentissage utilisée pour établir l'équation permettant d'estimer la quantifica-

tion adaptée, ce qui atteste la robustesse de cette estimation.

La figure 2.22 montre la courbe débit-distorsion du modèle "Rabbit". Pour ce modèle, notre méthode optimale donne de meilleurs résultats que AD 2001, VP 2004, PK 2005 et PHKEG 2010. La performance de MDCG 2010 est similaire à notre méthode optimale jusqu'à 4 bps puis elle devient meilleure pour des débits supérieurs. Pour ce modèle, la meilleure performance débit-distorsion est obtenue par VCP 2009.

Pour le modèle "Horse" (figure 2.23), notre méthode optimale donne de meilleurs résultats que tous les autres algorithmes, surtout à bas débit. Au delà de 6 bps, MDCG 2010 présente de meilleurs résultats. Mais il faut noter que MDCG 2010 utilise une approximation de forme pour la prédiction de la géométrie, cela permet d'obtenir d'excellent résultats mais le calcul de cette approximation est très coûteux en temps. Par exemple, notre méthode quasi-optimale a besoin de moins de 1 seconde pour coder un maillage de 20 000 sommets, tandis que MDCG 2010 nécessite environ 3 minutes.

2.5.3 Robustesse de la méthode quasi-optimale

Dans cette section, nous étudions la robustesse de notre méthode quasi-optimale. D'abord, nous avons appliqué nos méthodes sur les modèles "Bimba" (Figure 2.24) et "David head" (figure 2.25), qui ont des surfaces complexes comportant un nombre important d'éléments de hautes fréquences. Notons que ces modèles ne sont pas utilisés pour établir l'équation de la précision de quantification de notre méthode. D'abord, on observe que notre méthode optimale donne de meilleurs résultats que AD 2001 et VP 2004 pour ces deux modèles. Notre méthode quasi-optimale présente des résultats similaires pour le modèle "Bimba". Par contre, son efficacité est dégradée pour le modèle "David head", la raison principale étant que les coefficients utilisés pour estimer la précision de quantification sont obtenus à partir d'objets plutôt lisses. Toutefois, on observe que la performance de notre méthode quasi-optimale reste toujours meilleure que AD 2001 et VP 2004.

La robustesse et la stabilité de notre méthode quasi-optimale ont également été évaluées en faisant varier les coefficients de l'équation 2.24. Premièrement, nous avons modifié ces coefficients en les multipliant par 0,95 et 0,9 (variation de 5% et 10%). Pour le modèle "Dinosaur" (figure 2.26), on observe que la performance de notre méthode quasi-optimale reste pratiquement inchangée pour une variation de 5% ; on observe une légère dégradation pour une variation de 10%. On observe que le modèle "Mannequin" (figure 2.27) est plus sensible à la variation des coefficients. Dans le pire des cas, la modification de 10% conduit à une augmentation locale de distorsion de $0,4 \cdot 10^{-3}$ par rapport à la

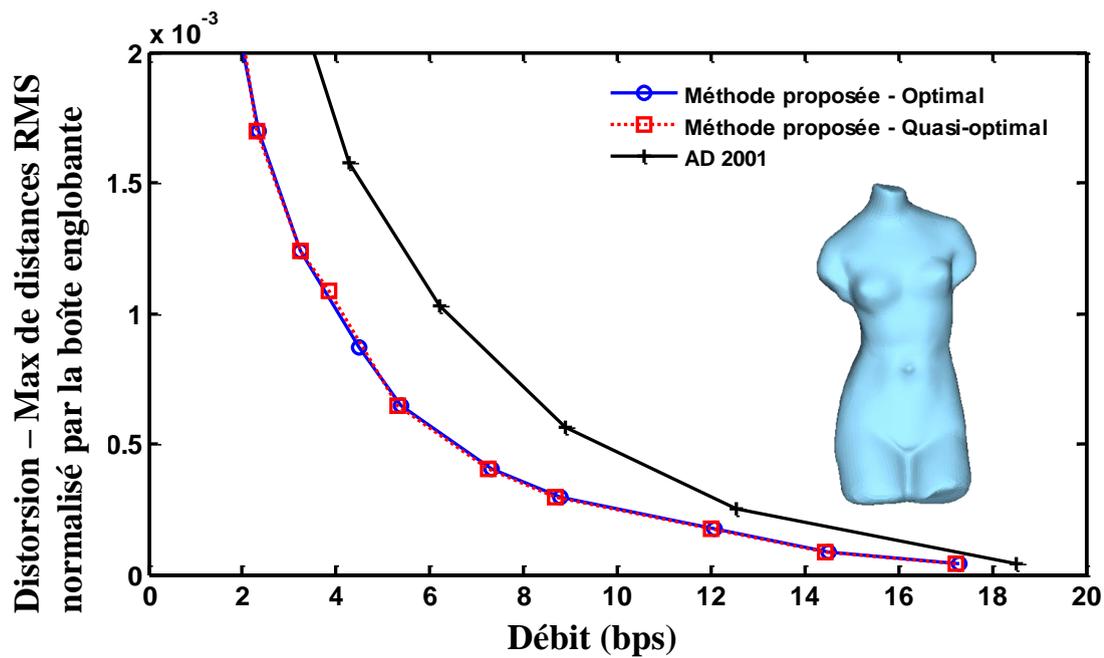


FIGURE 2.20 – Courbe débit-distorsion de Venusbody.

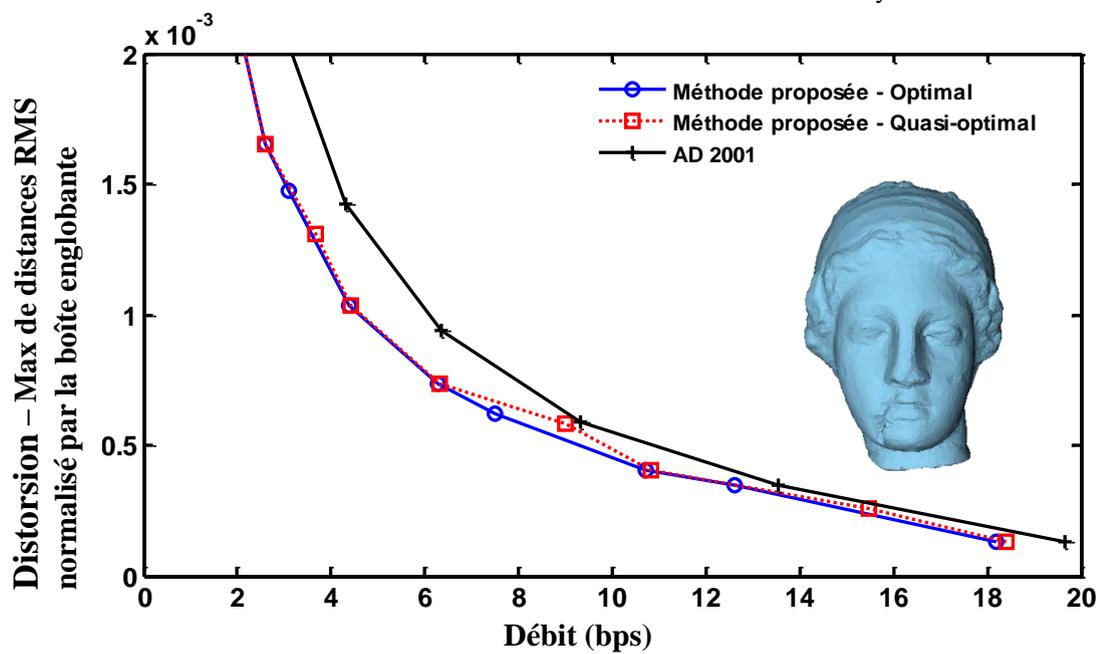


FIGURE 2.21 – Courbe débit-distorsion de Venushead.

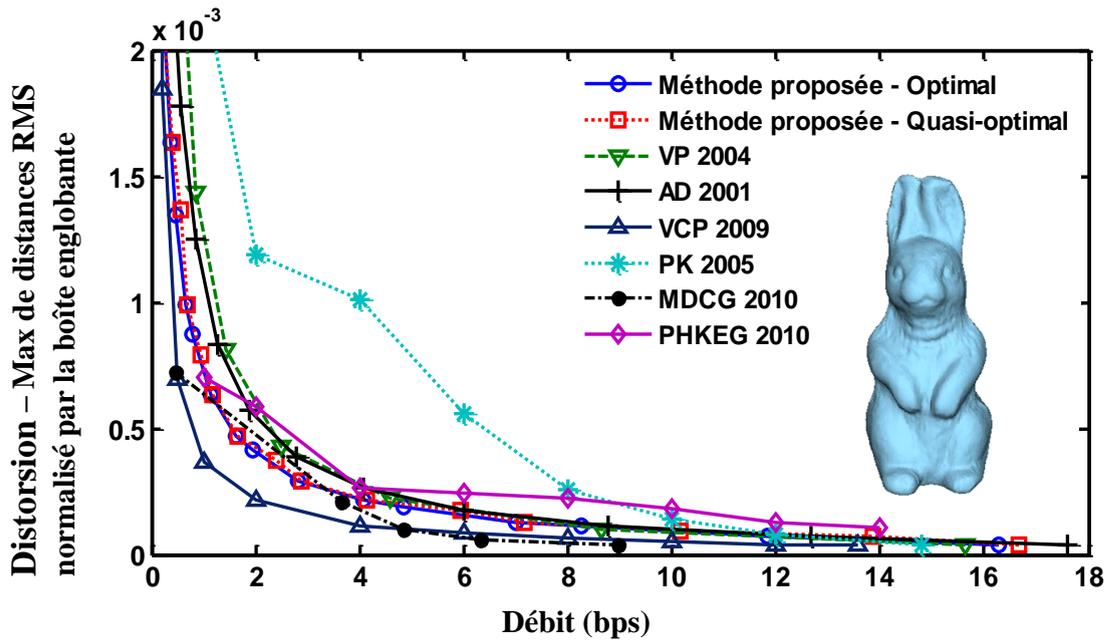


FIGURE 2.22 – Courbe débit-distorsion de Rabbit.

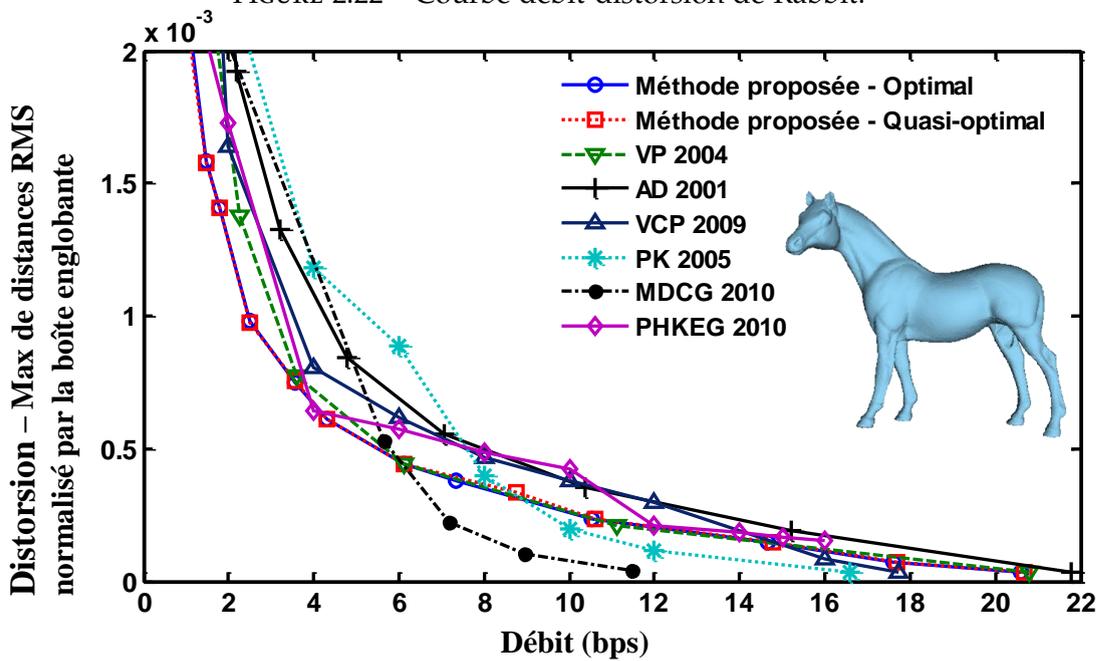


FIGURE 2.23 – Courbe débit-distorsion de Horse.

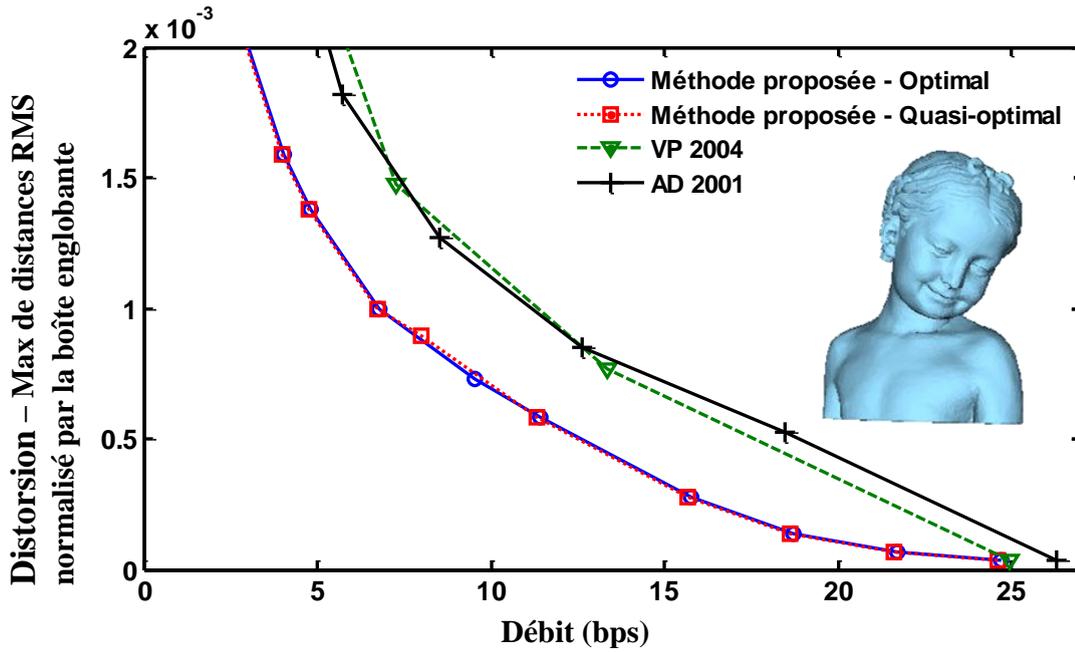


FIGURE 2.24 – Courbe débit-distorsion de Bimba.

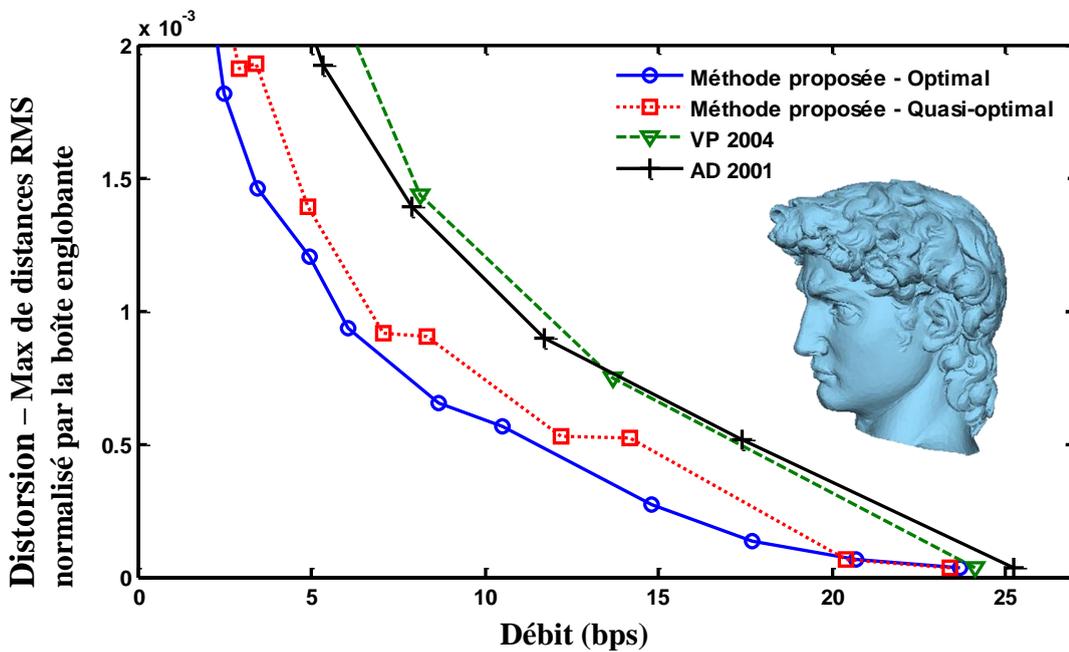


FIGURE 2.25 – Courbe débit-distorsion de David head.

méthode optimale pour ce modèle.

Deuxièmement, une seconde base d'apprentissage, établie en utilisant notre méthode optimale sur un autre ensemble de maillages, a été utilisée pour calculer de nouveaux coefficients pour l'équation 2.24. Avec cette nouvelle base, nous obtenons $a = -1,192$ et $b = -0,9602$. Le coefficient a varie de 4,5% et b de 0,7%. Par rapport aux tests d'avant, ces coefficients devraient donc produire des résultats similaires à ceux de la base précédente. Notre processus d'apprentissage semble donc peu dépendant de la base d'apprentissage.

Les courbes débit-distorsion des modèles "Bimba" et "Horse", obtenues en appliquant notre méthode quasi-optimale avec ces nouveaux coefficients, sont illustrées dans les figures 2.28 et 2.29. Pour le modèle "Bimba", qui appartient à la nouvelle base, notre méthode quasi-optimale donne des résultats très similaires à la méthode optimale. Pour le modèle "Horse", la précision de quantification n'est pas déterminée de manière optimale pour certains niveaux de détails. Toutefois, la performance de débit-distorsion est toujours meilleure que AD 2001.

2.5.4 Temps de traitement

Les tableaux 2.3 et 2.4 listent respectivement les temps d'exécution de l'encodage et ceux du décodage de notre algorithme basé sur la détermination optimale (section 2.4.2), basé sur la détermination quasi-optimale (section 2.4.3) et de l'algorithme d'Alliez et Desbrun [AD01a]. Les expériences ont été menées sur un PC portable muni d'un processeur Intel dual-core (2,8 GHz) avec 4 Go de mémoire. Les résultats de AD 2001 sont obtenus en utilisant notre propre implémentation.

On peut remarquer que notre méthode reposant sur la détermination optimale nécessite un temps de calcul de l'encodage très important, principalement à cause de la mesure de la distorsion à chaque itération. Par exemple, notre méthode optimale prend 3737,5 secondes pour le modèle "Neptune" (249 425 sommets) tandis que AD 2001 ne demande que 4,3 secondes. Notre méthode quasi-optimale basée sur l'estimation de la complexité géométrique permet de réduire le temps d'encodage de façon significative, en consommant seulement 7,5 secondes pour le même modèle. En moyenne, notre méthode quasi-optimale nécessite près de deux fois plus de temps de calcul que AD 2001. Le temps supplémentaire vient d'une part du temps nécessaire pour les étapes de diminution de la précision de quantification et d'autre part du fait d'utiliser la bijection pour coder la position de chaque sommet. Lors du décodage, notre méthode optimale et notre méthode quasi-optimale prennent un temps de calcul presque identique.

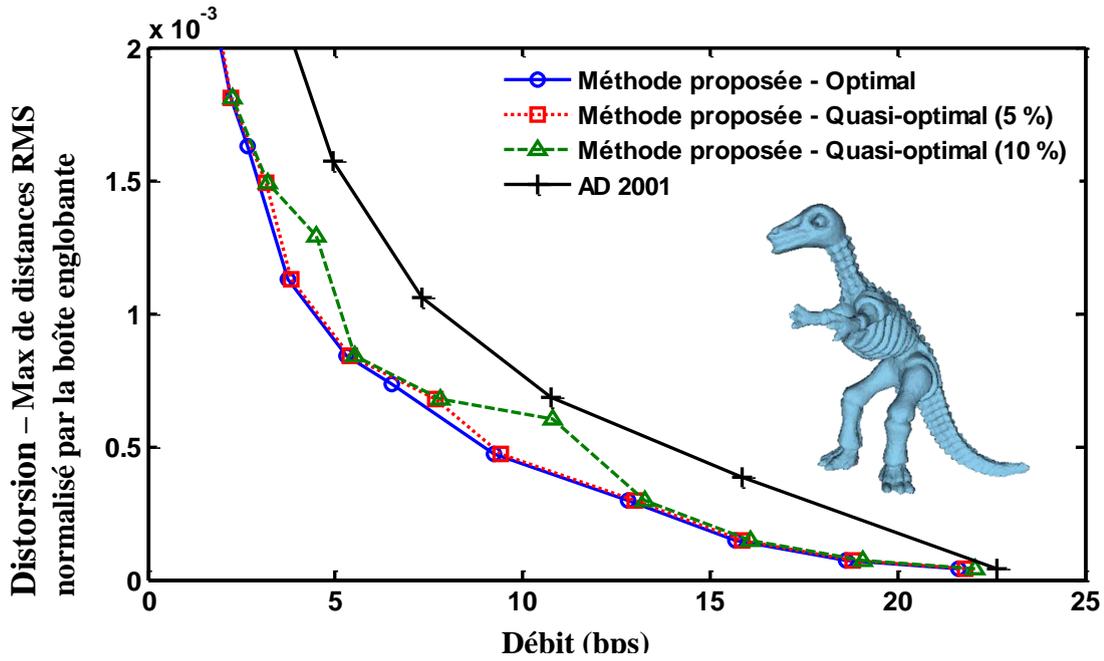


FIGURE 2.26 – Courbe débit-distorsion de Dinosaur. Les coefficients de la méthode quasi-optimale sont modifiés.

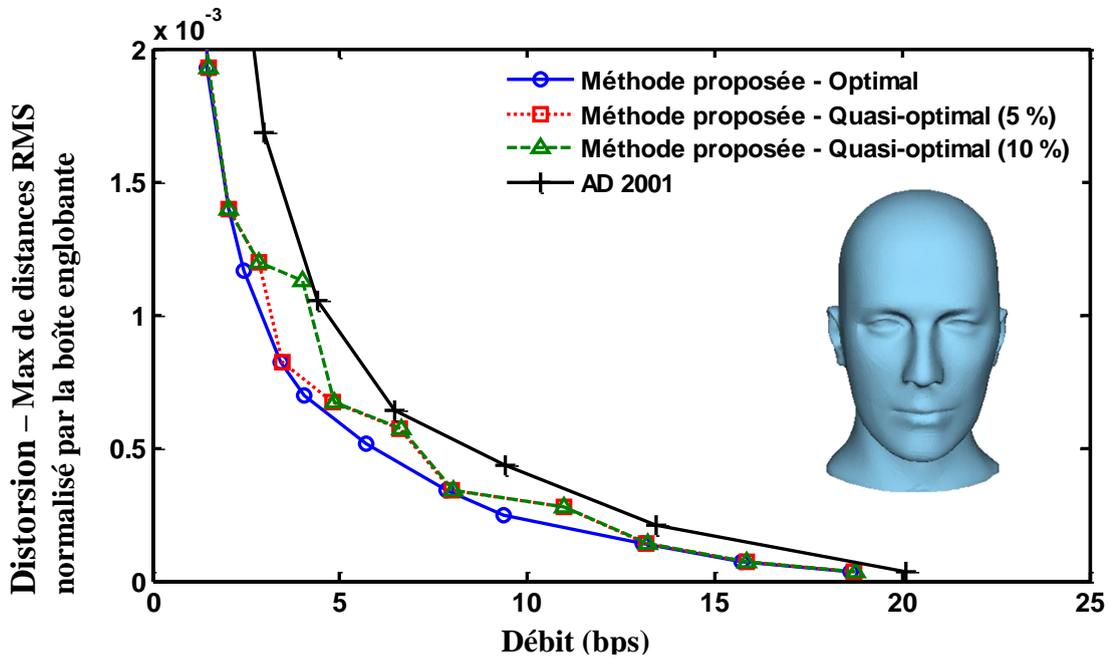


FIGURE 2.27 – Courbe débit-distorsion de Mannequin. Les coefficients de la méthode quasi-optimale sont modifiés.

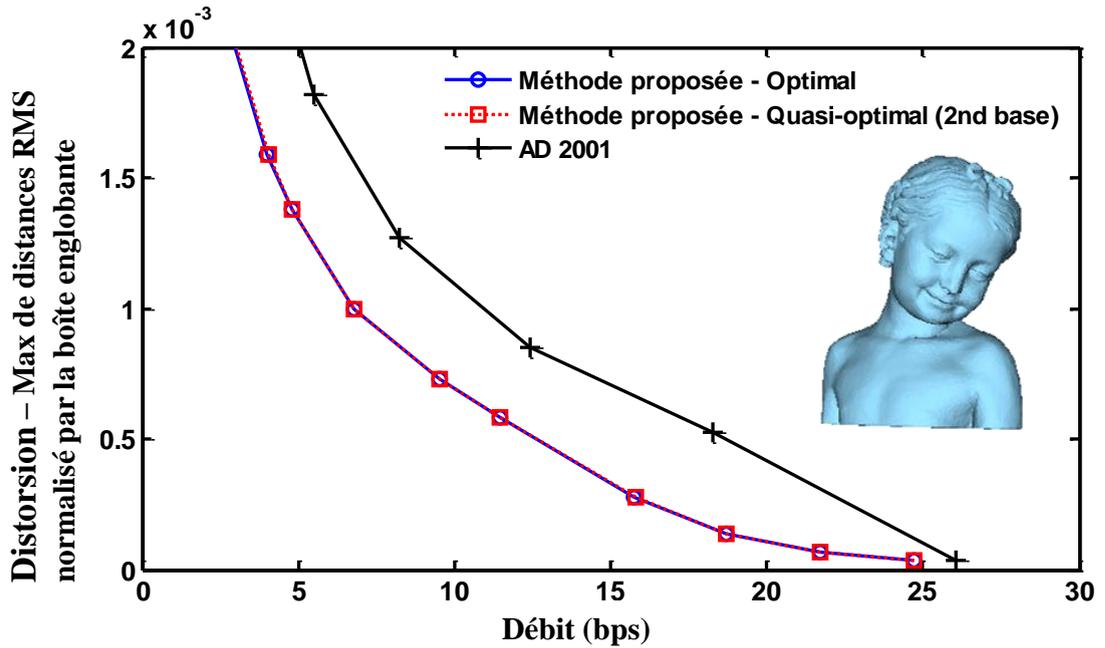


FIGURE 2.28 – Courbe débit-distorsion de Bimba. Le résultat de la méthode quasi-optimale est obtenu en utilisant des nouveaux coefficients issus de la deuxième base.

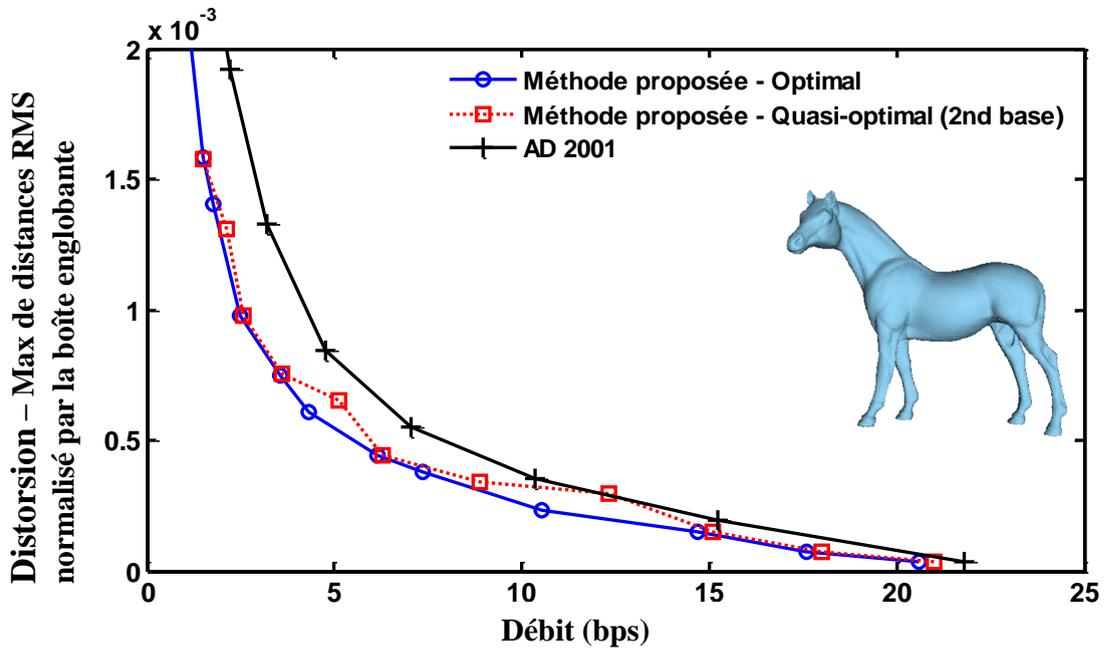


FIGURE 2.29 – Courbe débit-distorsion de Horse. Le résultat de la méthode quasi-optimale est obtenu en utilisant des nouveaux coefficients issus de la deuxième base.

TABLEAU 2.3 – Comparaison du temps d'exécution de l'encodage entre notre approche et l'algorithme d'Alliez et Desbrun (AD 2001) [AD01a] en secondes.

Model	# v	Q	AD 2001	Algorithme proposé	
				Optimal	Quasi-optimal
Fandisk	6475	10	0,1	38,8	0,2
Venusbody	11362	12	0,2	49,6	0,4
Horse	19851	12	0,5	131,8	0,8
Torus	36450	12	0,3	177,2	0,7
Rabbit	67039	12	1,0	662,1	2,4
Neptune	249425	12	4,3	3737,5	7,5

TABLEAU 2.4 – Comparaison du temps d'exécution du décodage entre notre approche et l'algorithme d'Alliez et Desbrun (AD 2001) [AD01a] en secondes.

Model	# v	Q	AD 2001	Algorithme proposé	
				Optimal	Quasi-optimal
Fandisk	6475	10	0,1	0,1	0,1
Venusbody	11362	12	0,1	0,3	0,3
Horse	19851	12	0,2	0,7	0,6
Torus	36450	12	0,3	0,7	0,7
Rabbit	67039	12	0,8	2,0	1,9
Neptune	249425	12	3,4	5,2	5,3

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle méthode de compression progressive sans perte pour des maillages 3D sans attribut de couleur. Plus précisément, nous avons proposé une méthode permettant d'optimiser le compromis débit-distorsion en adaptant la précision de quantification à la complexité de chaque niveau de résolution.

Dans un premier temps, cette précision est déterminée de façon optimale, en choisissant à chaque itération la prochaine opération entre décimation et diminution de la précision de quantification, de manière à optimiser le compromis débit-distorsion. En outre, une méthode permettant de coder de manière efficace l'opération inverse de la diminution de la précision de quantification a été également proposée.

Dans un second temps, une méthode de détermination quasi-optimale a été présentée afin de réduire le temps de calcul, long à cause de la mesure de distorsion géométrique à chaque itération. Dans cette méthode, la précision optimale est estimée de manière rapide et simple à partir d'une mesure de complexité, et la performance en termes de débit-distorsion est similaire à notre méthode de détermination optimale. La robustesse et la stabilité de notre méthode quasi-optimale sont aussi étudiées dans ce chapitre.

Nous avons également présenté une nouvelle méthode de codage de la géométrie.

Le repère de Frenet est utilisé afin de représenter la position d'un sommet en composante tangentielle et normale. Le changement de repère nécessitant une étape de post-quantification, introduit un surcoût de codage. Notre codeur a substitué cette étape de post-quantification par une bijection discrète afin d'éliminer ce surcoût. En outre, nous avons amélioré cette bijection en minimisant les angles de rotation.

Les résultats montrent que la méthode proposée permet d'adapter convenablement la précision de quantification pour chaque maillage intermédiaire, et d'optimiser le compromis débit-distorsion. La performance de notre méthode est meilleure ou très similaire à celle des méthodes les plus récentes en termes de compromis débit-distorsion.

Un des intérêts de cette méthode est sa rapidité ; une quantification adaptée à chaque maillage intermédiaire peut être obtenue rapidement. De plus, cette méthode peut être intégrée dans la plupart des algorithmes progressifs afin d'améliorer leurs performances débit-distorsion.

Une perspective serait d'augmenter la robustesse de notre méthode quasi-optimale pour que la précision soit correctement estimée pour des objets complexes.

Pour l'instant, tous les sommets d'un niveau de détails ont la même précision de quantification. Nous prévoyons également adapter cette précision pour chaque sommet de manière indépendante, pour améliorer encore le compromis débit-distorsion.

Chapitre 3

Compression progressive de maillages avec attributs couleur

Sommaire

3.1	Etat de l'art	58
3.1.1	Approches mono-résolution	58
3.1.2	Approches progressives	60
3.2	Méthodes de compression	62
3.2.1	Espace de couleur	62
3.2.2	Méthode basée sur la prédiction	62
3.2.3	Méthode basée sur la table de correspondance	64
3.3	Métrique pour la compression progressive dirigée par la couleur	66
3.4	Optimisation du compromis débit-distorsion	71
3.4.1	Changement de la précision de quantification de la couleur	73
3.4.2	Détermination optimale de la prochaine opération	74
3.4.3	Détermination rapide et quasi-optimale de la prochaine opération	77
3.4.3.1	Estimation de la précision de quantification de la géométrie	77
3.4.3.2	Estimation de la précision de quantification de la couleur	78
3.5	Résultats expérimentaux	82
3.5.1	Taux de compression de la couleur	82
3.5.2	Performance débit-distorsion	84
3.5.3	Temps de traitement	87
3.6	Conclusion	87

L'utilisation des maillages possédant des données supplémentaires, telles que des couleurs, des vecteurs normaux ou des textures s'accroît de plus en plus par le fait que ces données peuvent jouer un rôle primordial dans la perception de l'objet.

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps un état de l'art des méthodes permettant de simplifier et d'encoder ce type de maillages. Ensuite, nous proposons deux méthodes de codage des données de couleur associées aux sommets : une méthode basée sur la prédiction et une autre méthode basée sur une table de correspondance. Nous introduisons également une méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion basée sur l'adaptation de la précision de quantification de la géométrie et de la couleur à la complexité de chaque maillage intermédiaire. Cette adaptation peut être réalisée de façon optimale en mesurant la distorsion ou de manière quasi-optimale à l'aide d'un modèle théorique afin de réduire le temps de calcul. Pour améliorer davantage le compromis débit-distorsion, nous proposons également une métrique qui permet d'améliorer la qualité visuelle de chaque maillage intermédiaire en préservant ses éléments caractéristiques pendant le processus de simplification. Enfin, nous présentons les résultats des méthodes proposées.

3.1 Etat de l'art

Dans cette section, nous présentons les approches manipulant les maillages avec attributs en les classant en deux catégories : approches mono-résolution et approches progressives.

3.1.1 Approches mono-résolution

Généralement, les auteurs utilisent un mécanisme de prédiction pour réduire le coût de codage en exploitant les informations de voisinage (géométrie et connectivité). D'abord, Deering [Dee95] a proposé une méthode pour le codage des couleurs et de normales associées à chaque sommet d'un maillage dans le cadre de la compression mono-résolution. Pendant le parcours du maillage, la couleur est encodée en utilisant une prédiction différentielle. C'est-à-dire que pour une couleur d'un sommet, la différence par rapport à la couleur du sommet précédent est codée. Pour coder les normales, l'auteur représente d'abord la normale d'un sommet par un indice (parmi 48) suivant sa direction. Puis, l'auteur code ces indices des normales en utilisant une prédiction différentielle. Bajaj et al. [BPZ99b] ont introduit plusieurs méthodes de prédiction pour encoder les normales associées aux sommets : les deux premières méthodes utilisent la moyenne des normales

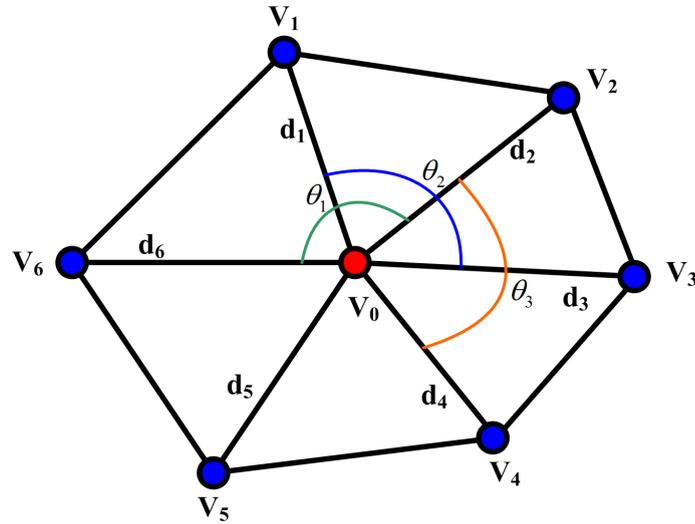


FIGURE 3.1 – Méthode de prédiction pour le codage de la couleur dans le travail de Yoon et al. [YKH06].

des faces adjacentes et la normale de la surface d'approximation pour la prédiction. La troisième méthode subdivise les faces adjacentes et utilise leur normale pour prédire la normale du sommet courant. Ahn et al. [AKH06] ont proposé une méthode basée sur une table de correspondance et une prédiction différentielle pour encoder la couleur associée au sommet. Dans cette méthode, la normale moyenne des triangles adjacents est utilisée comme prédicteur pour encoder la normale. Yoon et al. [YKH06] ont également introduit une méthode de prédiction pour la couleur. Cette méthode est illustrée dans la figure 3.1. Pour coder la couleur du sommet courant V_0 , les auteurs utilisent les couleurs des sommets voisins ; un poids w_i est calculé pour chaque sommet voisin V_i suivant sa distance euclidienne par rapport à V_0 et l'angle des triangles adjacents autour du sommet courant θ_i . Ce poids est ensuite normalisé par la somme du rapport entre la distance et l'angle de tous les sommets voisins :

$$w_i = \frac{\theta_i}{d_i} \bigg/ \sum_{j=1}^6 \frac{\theta_j}{d_j} \quad (3.1)$$

Dans cette équation, j désigne l'indice de sommet voisin. Ensuite, la moyenne pondérée des couleurs des sommets voisins est utilisée pour prédire la couleur du sommet courant.

Dans les méthodes mentionnées jusqu'ici, les attributs (couleur et normale) sont attachés aux sommets. Les attributs tels que les coordonnées de texture peuvent également être attachés aux coins (*corner en anglais*) pour représenter plus efficacement la discon-

tinuité sur la surface. Un coin est le point où un polygone est connecté à un sommet. Un triangle a alors trois coins, et un sommet a autant de coins que le nombre de triangles adjacents. La représentation de l'attribut étant différente, la technique du codage est également très différente [Iseo2].

Généralement, les coins d'un sommet possèdent la même valeur de l'attribut. Donc, afin d'améliorer le taux de compression en évitant d'encoder plusieurs fois la même valeur, Taubin et al. [THLR98] codent un bit de discontinuité pour chaque coin. Ce bit de discontinuité montre si la valeur du coin courant est identique à celle du coin précédent. Pourtant, les auteurs n'exploitent pas ces bits de discontinuité dans le mécanisme de prédiction pour un codage plus efficace. Isenburg et Snoeyink [ISo3] ont proposé une nouvelle méthode de prédiction adaptée pour les différentes configurations de discontinuité des coins afin d'optimiser la compression. Kim et al. [KYK*05] ont proposé une autre solution pour gérer cette discontinuité dans le cas d'une texture. Au lieu de modifier le mécanisme de prédiction, les auteurs modifient plutôt la carte de texture afin d'éliminer le plus possible les discontinuités lors de la projection sur le maillage.

Nous avons présenté jusqu'ici, les méthodes de codage des attributs dans le cadre de la compression mono-résolution. Il existe également des méthodes permettant de générer différents niveaux de détails d'un maillage possédant des attributs, basées sur la simplification séquentielle et quelques méthodes offrent également la possibilité de transmission progressive.

3.1.2 Approches progressives

Garland et Heckbert [GH98] ont étendu leur méthode de simplification basée sur l'erreur quadratique [GH97] pour simplifier des maillages avec attributs. Cette méthode de simplification génère de nombreux niveaux de détails en appliquant successivement l'opération de contraction d'arête. Pour chaque itération, l'erreur quadratique en termes de géométrie et de couleur est calculée pour chaque arête. Ensuite, à chaque itération, l'arête dont la valeur de l'erreur quadratique est minimale est contractée. Plus tard, Hoppe [Hop99] a introduit une version améliorée de cette méthode [GH98]. Il donne la priorité plutôt à la géométrie lors du calcul de l'erreur quadratique et prend en compte la discontinuité des données associées, sa méthode permet de produire des maillages simplifiés ayant une meilleure qualité visuelle que la méthode originale. Dans [KCLo8], Kim et al. ont proposé une autre extension de la méthode basée sur l'erreur quadratique [GH97]. Dans cette méthode, l'erreur de la géométrie et celle de la couleur sont calculées séparément pour chaque arête. L'erreur géométrique est mesurée comme l'er-

reur quadratique de Garland et Heckbert [GH97] et l'erreur de la couleur est obtenue en mesurant la différence de couleur par rapport aux couleurs des sommets voisins. Cette méthode permet de mieux préserver la géométrie par rapport à [GH98], mais les petits détails de couleur ne sont pas bien représentés dans les maillages simplifiés. Dans [RCPA01], Rigioli et al. ont proposé une méthode de simplification pour les maillages avec des données de texture, basée sur un schéma de raffinement. Un maillage grossier est d'abord obtenu par une simplification en tenant compte uniquement de la géométrie et ce maillage est raffiné itérativement par subdivision, en minimisant à chaque étape l'erreur de texture. Le triangle dont l'erreur est la plus importante est subdivisé en premier. Cohen et al. [COM98] ont proposé une méthode de simplification basée sur une métrique de déviation de texture. L'utilisation de cette métrique permet de contrôler la distorsion de la texture pendant la simplification et donc de préserver de façon adéquate l'apparence originale même pour des maillages fortement simplifiés. Dans [LToo], Lindstrom et Turk ont proposé une méthode basée sur les images. L'ordre des opérations de contraction d'arête est déterminé en calculant l'erreur entre les images du modèle original et celles du modèle simplifié. Sander et al. [SSGH01] ont proposé une méthode qui construit différents niveaux de détails en utilisant l'approche de *maillages progressifs* de Hoppe [Hop96]. En minimisant la déviation et l'étirement de la texture, les différents maillages intermédiaires peuvent partager la même paramétrisation, ce qui permet d'obtenir une bonne qualité d'approximation en basses résolutions. Ces méthodes de simplification sont capables de générer différents niveaux de résolution mais elles ne permettent pas une transmission progressive puisque aucune méthode de codage n'est proposée. Cirio et al. [CLD10] ont proposé une méthode de compression progressive pour les maillages avec des attributs de couleur associés aux sommets. Cette méthode est basée sur l'algorithme de compression progressive de Gandoïn et Devillers [GDo2] qui repose sur la décomposition en kd-tree. Pour le codage de la couleur, les auteurs représentent la couleur dans l'espace Luv et la différence par rapport à la couleur de la cellule-mère est encodée à chaque décomposition. Afin d'optimiser la qualité visuelle ainsi que le compromis débit-distorsion, chaque décomposition de la cellule est dirigée par la couleur. Pourtant, la qualité d'approximation des maillages intermédiaires, en particulier à bas débit n'est pas très bonne puisque cette méthode est basée sur une méthode de compression guidée par la géométrie.

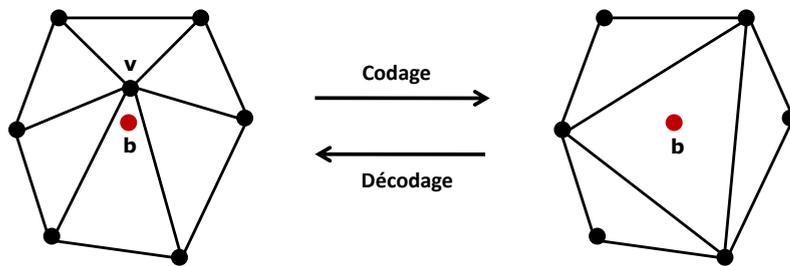


FIGURE 3.2 – Un sommet v est enlevé (resp. inséré) pendant le processus d’encodage (resp. décodage). Sa position est prédite à partir de la position moyenne des sommets voisins b .

3.2 Méthodes de compression

Dans ce chapitre, nous présentons une méthode d’optimisation du compromis débit-distorsion pour les maillages avec des attributs de couleur. Pour cela, nous étendons notre méthode présentée dans le chapitre 2 aux maillages comportant des informations de couleur.

Avant d’introduire notre méthode d’optimisation de la performance débit-distorsion, nous proposons deux méthodes de compression de la couleur.

3.2.1 Espace de couleur

Avant de compresser les couleurs, toutes les couleurs représentées initialement dans l’espace RVB sont converties dans l’espace $L^*a^*b^*$. Cet espace caractérise une couleur à l’aide d’un paramètre de luminance (L^*) et de deux paramètres de chrominance (a^* et b^*). Dans cet espace la distance euclidienne entre couleurs reflète correctement la différence perçue par l’oeil humain. De plus, l’espace $L^*a^*b^*$ est plus décorrélé que l’espace RVB, ce qui permet d’améliorer l’efficacité du codage [MF95]. Après cette transformation, chaque composante L^* , a^* et b^* est quantifiée en utilisant 8 bits, comme dans l’espace initial RVB.

3.2.2 Méthode basée sur la prédiction

Dans cette section, nous présentons notre méthode de codage de la couleur basée sur la prédiction. Comme nous nous appuyons sur l’algorithme proposé précédemment dans le chapitre 2 pour la simplification du maillage, une façon simple serait d’utiliser les couleurs des sommets voisins pour prédire la couleur du sommet courant.

Nous pouvons utiliser la moyenne des couleurs pour la prédiction comme pour le codage de la géométrie (la figure 3.2). Cette méthode de prédiction qui se révèle efficace

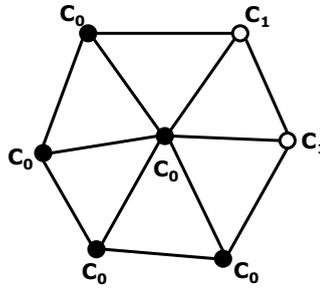


FIGURE 3.3 – La couleur du sommet à enlever (au milieu) est prédite à partir des couleurs des sommets voisins. Notre méthode considère la discontinuité de la couleur afin de réduire le coût de compression.

pour le codage de la géométrie, n'est pourtant pas adéquate pour encoder la couleur car ces deux types d'information ont des comportements différents. De manière générale, la position des sommets reliés par une arête sont très proches, ce qui rend cette prédiction efficace pour la géométrie. Par contre, les couleurs entre deux sommets adjacents peuvent être très différentes, en particulier pour des sommets se situant sur une discontinuité colorimétrique. Dans ce cas, une prédiction basée sur la couleur moyenne ne peut pas être efficace. Un exemple d'un cas de sommet sur une telle discontinuité est présenté dans la figure 3.3. Par simplicité, nous représentons sa couleur par un niveau de gris entre 0 et 255. En utilisant une prédiction classique, le sommet du centre sera prédit par la moyenne de ses 6 voisins : 4 sommets voisins ont la couleur C_0 (niveau de gris = 0) et deux autres ont la couleur C_1 (niveau de gris = 255). La couleur moyenne étant égale à 85, la différence $C_0 - 85 = -85$ est à encoder pour ce sommet.

Dans le même esprit que la méthode d'Isenburg et Snoeyink [ISO3], notre méthode prend en compte la discontinuité dans le mécanisme de prédiction pour optimiser le codage. D'abord on observe que chaque composante de couleur d'un sommet est généralement très proche d'au moins une des sommets voisins. Basée sur cette observation, notre méthode consiste à choisir une composante de couleur parmi celles des sommets voisins, afin de l'utiliser pour prédire chaque composante de couleur du sommet courant. Pour cela, nous calculons les valeurs moyennes de chaque composante L_{moy}^* , a_{moy}^* et b_{moy}^* . Ensuite, parmi les composantes de couleur des sommets voisins, nous sélectionnons celle dont la valeur est la plus proche de la valeur moyenne pour effectuer notre prédiction, et la différence est encodée. Dans la figure 3.3, cette méthode choisit la couleur C_0 pour la prédiction.

Pendant la décompression, nous utilisons le même mécanisme de prédiction pour décoder la couleur.

3.2.3 Méthode basée sur la table de correspondance

Dans cette section, nous présentons la deuxième méthode de codage de la couleur que nous avons introduite, elle est basée sur une table de correspondance. En utilisant 24 bits pour la quantification, il existe $2^{24} \approx 1,67 \cdot 10^7$ couleurs possibles. Cette représentation précise de la couleur n'est en général pas nécessaire, puisque le système visuel humain ne peut pas distinguer une telle précision.

L'idée principale de cette méthode est de diminuer le nombre de couleurs pour réduire le débit pendant la transmission. Ensuite nous utilisons une méthode de table de correspondance puisque cette méthode est particulièrement efficace lorsqu'il existe peu de couleurs. Nous encodons pour chaque sommet l'indice correspondant dans la table au lieu de la couleur elle-même. La figure 3.4 illustre le principe général de notre méthode pour l'encodage.

Pour éviter une déviation colorimétrique importante pendant la diminution du nombre de couleurs, il faut choisir attentivement les couleurs représentatives. Pour cela, nous utilisons l'algorithme des K-means. Cet algorithme procède comme suit :

1. K représentants de couleur sont choisis aléatoirement parmi les couleurs initiales.
2. K régions (clusters) sont créées en associant chaque couleur au représentant le plus proche.
3. Les centroïdes de chaque région sont calculés et utilisés comme les nouveaux représentants pour mettre à jour les régions.

L'algorithme répète les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que l'erreur de correspondance soit inférieure à un seuil. Dans notre méthode, l'erreur d'un sommet est mesurée en calculant la différence de couleur avant et après le clustering, et l'algorithme se termine lorsque l'erreur moyenne est inférieure à un seuil. Chaque composante de couleur est représentée par un entier entre 0 et 255 et l'erreur est calculée en utilisant la distance euclidienne. Nous fixons le seuil à 0,001 et si jamais l'erreur moyenne ne passe pas sous le seuil au bout de 200 itérations, l'algorithme se termine.

Après avoir obtenu les K représentants finaux, la table de correspondance est générée, un indice de couleur est attribué à chaque sommet et la couleur de chaque sommet est remplacée par celle du représentant le plus proche.

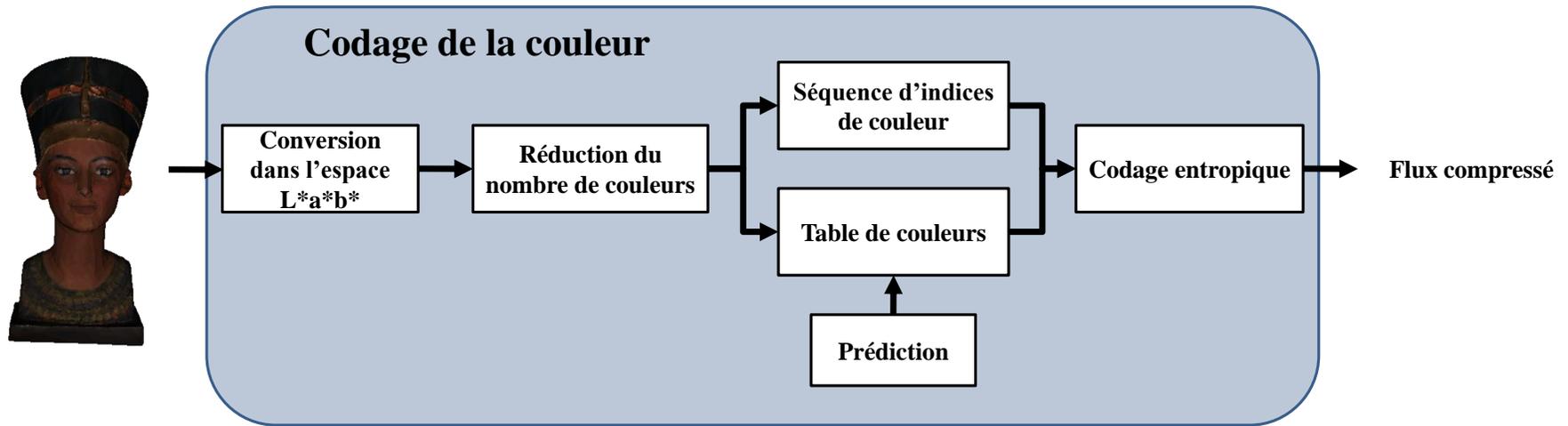


FIGURE 3.4 – Diagramme du processus d’encodage de notre méthode basée sur la table de couleur.

Dans la figure 3.5, nous illustrons quelques résultats de cette réduction du nombre de couleurs avec le modèle "Globe". Le nombre de couleur initial est de 5 030 et nous le réduisons à 64, à 128 et à 256. Bien que le nombre soit réduit de manière significative, la déformation est difficilement perceptible.

Pour encoder les couleurs associées aux sommets, nous devons encoder l'indice couleur de chaque sommet et les valeurs des couleurs de la table. Lorsque la taille de la table est grande, son coût de codage n'est pas négligeable. Ainsi, au lieu de restaurer toutes les couleurs de la table au début de la décompression, nous les transmettons progressivement pour améliorer la performance débit-distorsion. La figure 3.6 décrit cette transmission progressive de la table. Pour un niveau de détail i , il existe 2 couleurs possibles (la figure 3.6.a). Lorsque les nouveaux sommets sont insérés, une nouvelle couleur peut apparaître. Les valeurs de cette couleur sont transmises à ce moment là en agrandissant la table (la figure 3.6.b). Pour cette transmission progressive, nous devons également ré-ordonner l'ordre des couleurs dans la table en fonction du moment d'apparition de chaque couleur. En outre, nous essayons de réduire le coût de codage nécessaire pour la table de correspondance. Lorsqu'une nouvelle couleur apparaît, nous l'encodons en utilisant notre méthode de prédiction (Section 3.2.2).

Un défaut de cette méthode basée sur la table de correspondance est que les couleurs originales ne sont pas restaurées à la fin de la transmission en raison de l'étape de réduction du nombre de couleurs. Pour réaliser une compression sans pertes, nous encodons la différence de couleur de chaque sommet après l'étape de réduction du nombre de couleurs à l'encodage. Ainsi au décodage, ces différences sont transmises à la fin de la transmission pour restaurer les couleurs initiales.

3.3 Métrique pour la compression progressive dirigée par la couleur

Avec la géométrie, la couleur contribue de façon significative à la qualité visuelle du modèle. Ainsi la conservation des éléments caractéristiques liés à la couleur est un enjeu important pour une transmission efficace.

Dans cet objectif, nous proposons dans cette section une métrique permettant de préserver les sommets ayant des couleurs importantes. Plus précisément, pendant la phase de simplification de l'encodage, cette métrique permet d'interdire la suppression d'un sommet qui peut provoquer une forte déformation colorimétrique.

Notre métrique mesure l'erreur de chaque sommet en termes de géométrie E_G et de

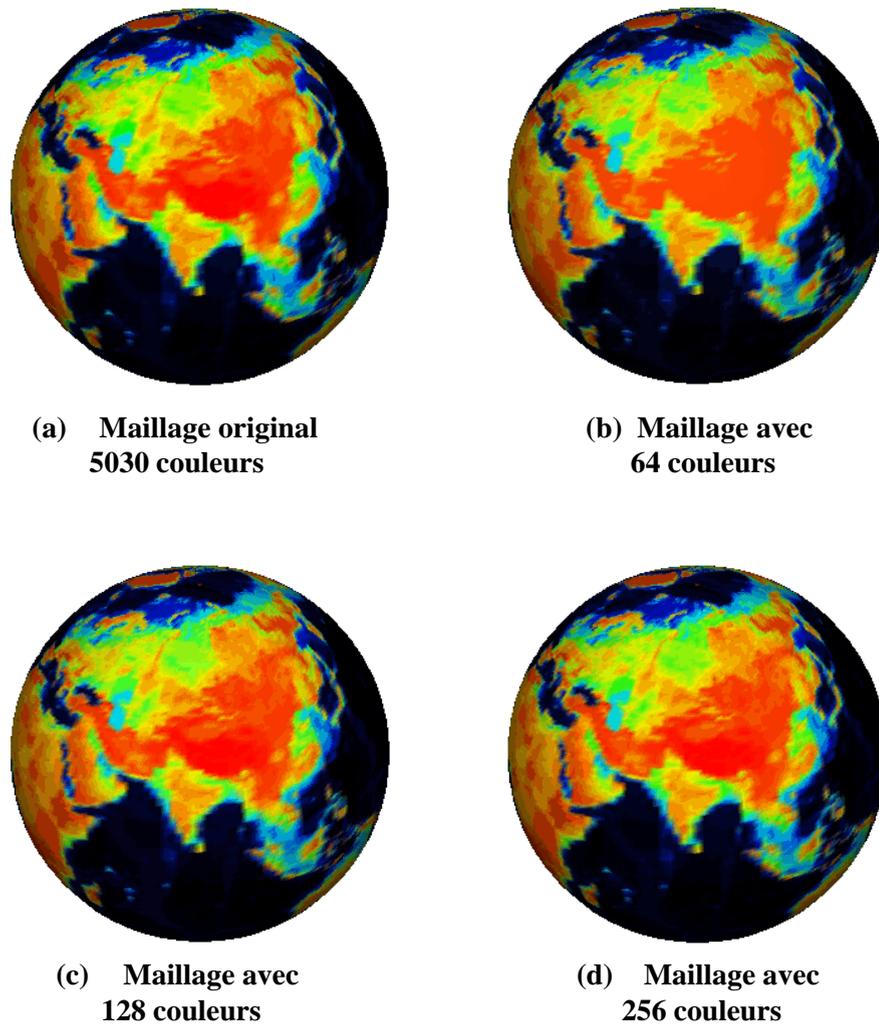


FIGURE 3.5 – Réduction du nombre de couleurs basée sur un algorithme de clustering pour le modèle "Globe".

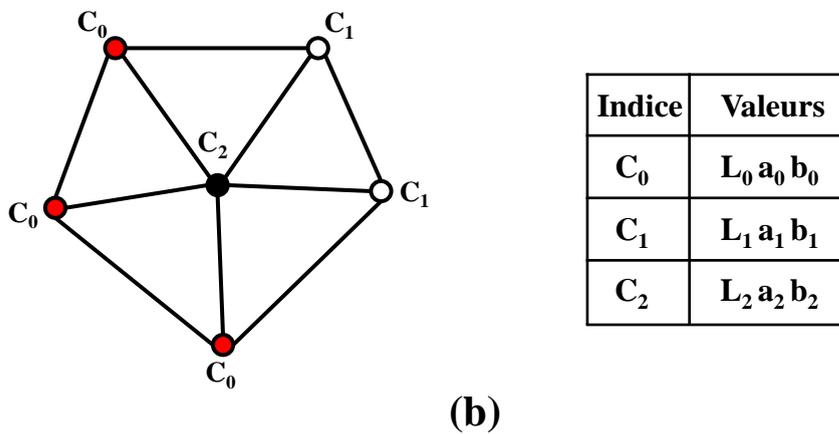
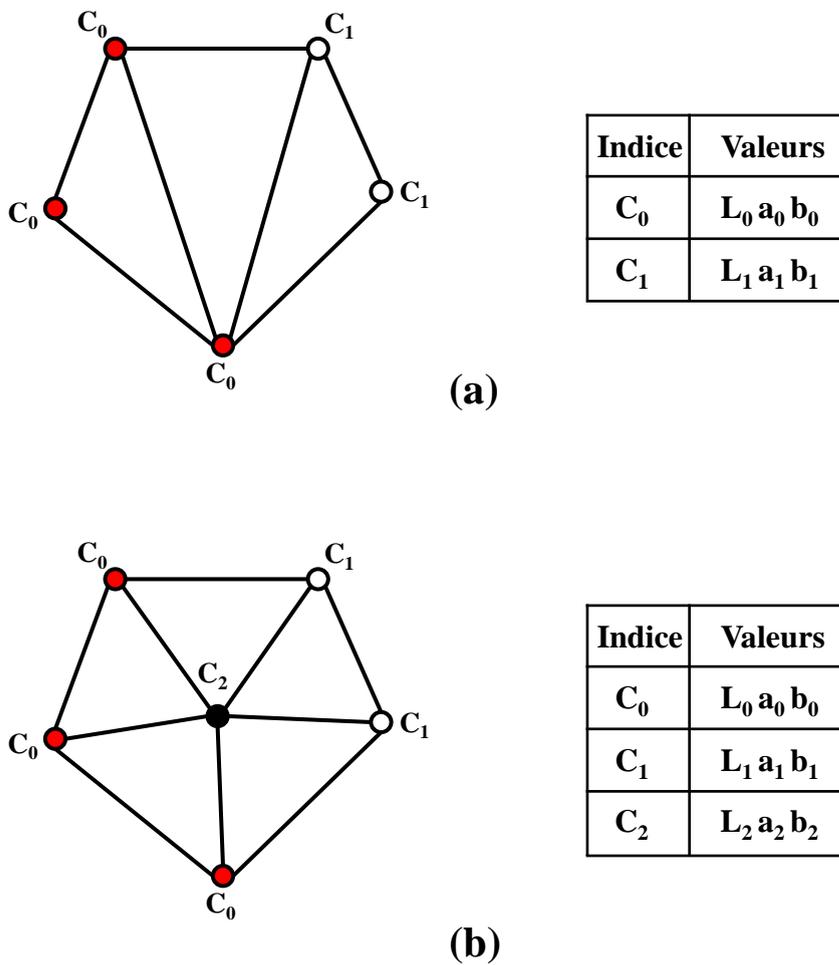


FIGURE 3.6 – Un exemple de décodage progressif de la table de couleur. La table courante (a) s'agrandit quand une nouvelle couleur, C_2 , apparaît (b).

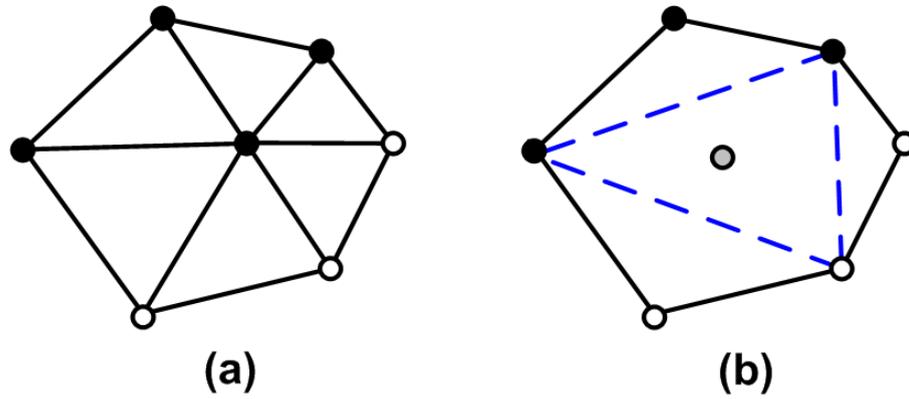


FIGURE 3.7 – E_C est calculée en mesurant la différence entre la couleur du sommet courant (couleur noire) et la couleur estimée après la suppression et la re-triangulation (couleur grise). Cette couleur estimée est obtenue en appliquant l'interpolation sur les couleurs des trois sommets du triangle central du patch après la re-triangulation.

couleur E_C :

$$E_{Mét} = E_G \times E_C \quad (3.2)$$

Si l'erreur $E_{Mét}$ d'un sommet est inférieure à un seuil, nous enlevons ce sommet, sinon nous le préservons.

L'erreur de couleur E_C reflète la variation de la couleur de la surface locale (patch courant) avant et après l'enlèvement du sommet. Le calcul de cette erreur est présenté dans la figure 3.7. E_C est calculée en mesurant la distance euclidienne entre la couleur du sommet courant C_1 et la couleur de sa position estimée après l'enlèvement C_2 . D'abord, nous supposons que le sommet courant est situé près du barycentre du triangle central (triangle bleu dans la figure). Ensuite, la couleur C_2 est obtenue en interpolant les couleurs des trois sommets de ce triangle. Dans cette figure, E_C correspond donc à la différence de la couleur du sommet courant (couleur noire) et la couleur du barycentre du triangle central du patch après la retriangulation (couleur grise).

L'utilisation seule de E_C permet de préserver les éléments caractéristiques de la couleur dans tous les niveaux de détails. Pourtant la qualité de la géométrie n'est pas très bonne, comme nous le montre la figure 3.8. La forme initiale de la géométrie est mal préservée. Dans cette figure, le modèle "GIST-Monkey" est simplifié en utilisant E_C avec un seuil de 0,5. Chaque composante de couleur est représentée par un entier entre 0 et 255 et la distance euclidienne est utilisée pour mesurer E_C . Si l'erreur E_C obtenue est inférieure à 0,5, le sommet est enlevé, sinon, il est préservé. Nous observons que la plupart des sommets sont utilisés pour représenter les détails de la couleur, mais la qualité visuelle est dégradée significativement dû à la déformation géométrique. De plus, en

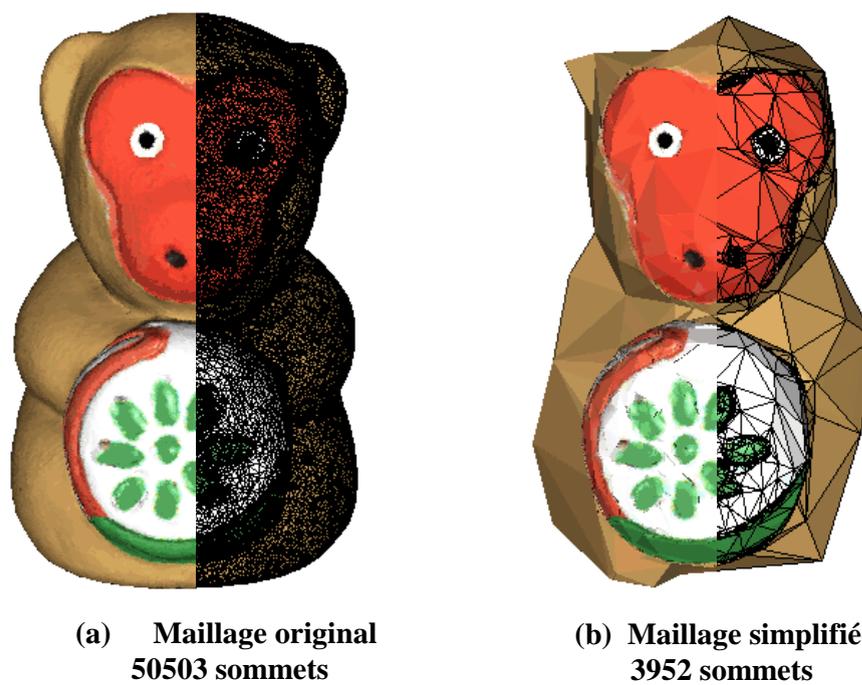


FIGURE 3.8 – Le maillage original du modèle "GIST-Monkey" (à gauche) et le maillage simplifié du même modèle (à droite) en utilisant notre métrique basée sur l'erreur de la couleur E_C uniquement. On constate que la couleur est bien préservée, mais la géométrie n'est pas conservée correctement.

préservant les sommets importants à chaque itération de simplification, le nombre de codes incidents augmente et donc le coût de la connectivité également.

Pour équilibrer la distribution des sommets entre la couleur et la géométrie, nous introduisons l'erreur géométrique E_G . Avec cette erreur, l'objectif est d'adapter le niveau de détails de la couleur à la complexité géométrique de chaque maillage intermédiaire. Cette erreur géométrique est définie comme le rapport entre l'aire moyenne des triangles autour du sommet courant et l'aire moyenne de tous les triangles du maillage. Ce rapport estime l'aire relative de la surface concernée par la suppression du sommet. Ce rapport permet d'adapter le degré de détail de la couleur à chaque niveau de résolution; même si l'erreur de la couleur E_C est importante, le sommet peut être supprimé si l'aire de la surface concernée est relativement petite; inversement même si l'erreur de la couleur E_C est faible, le sommet n'est pas enlevé si l'aire de la surface locale est importante.

Un facteur important de cette métrique est la valeur du seuil. D'après nos expérimentations, la valeur du seuil doit changer pour différents modèles d'entrée en raison de leurs différentes distributions de couleurs sur la surface. Afin d'avoir une valeur fixe du seuil valable pour tous les modèles, nous modifions E_C . Plus précisément, nous normalisons E_C en la divisant par une valeur de complexité de couleur du maillage. Cette complexité est calculée en moyennant la différence de couleur des deux sommets de chaque arête. Avec cette normalisation, le seuil peut être fixé à 0,5 pour tous les modèles. La figure 3.9 illustre des maillages simplifiés en utilisant notre métrique avec ce seuil. La distribution des sommets est bien équilibrée pour représenter de manière appropriée la géométrie et la couleur pour chaque maillage intermédiaire. Nous comparons dans la figure 3.10 le maillage simplifié du modèle "Globe" avec (b) ou sans (c) notre métrique pour un nombre de sommets similaire (a). L'utilisation de notre métrique permet d'améliorer la qualité visuelle.

Dans la section suivante, nous nous intéressons à l'optimisation de la performance débit-distorsion des maillages colorés.

3.4 Optimisation du compromis débit-distorsion

Dans cette section, nous présentons notre méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion pour les maillages possédant des attributs couleur associés aux sommets. Pour cette optimisation, nous étendons notre méthode d'optimisation présentée dans le chapitre 2 pour les maillages avec attributs de couleur, en adaptant la précision de quantification de la géométrie et celle de la couleur à la complexité de chaque maillage

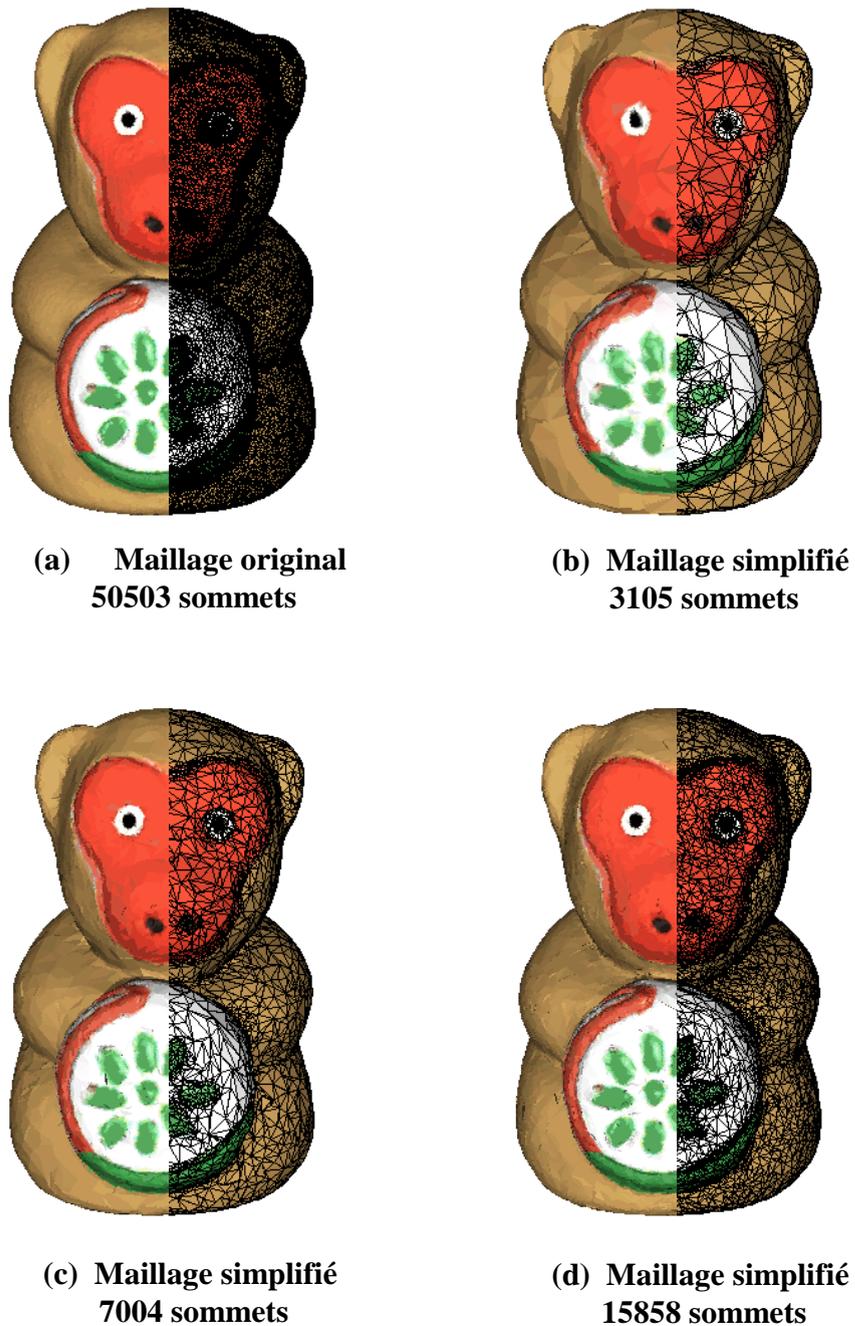


FIGURE 3.9 – Le maillage original du modèle "GIST-Monkey" (a) et les maillages simplifiés du même modèle en utilisant notre métrique basée sur l'erreur de la couleur E_C et l'erreur de la géométrie E_G . Pour chaque niveau de résolution, le niveau de préservation de la couleur est adapté.

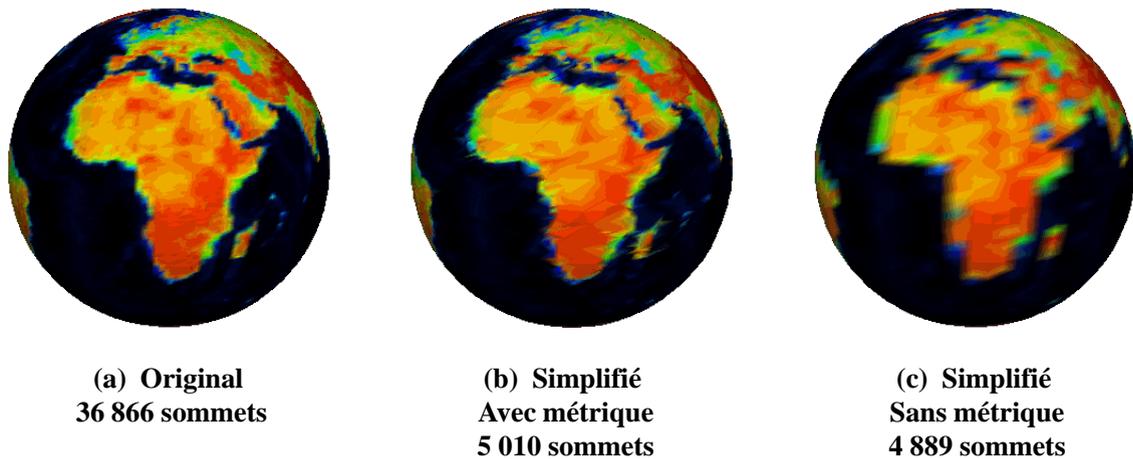


FIGURE 3.10 – Le maillage original (à gauche) et les maillages intermédiaires avec (au centre) et sans (à droite) l'utilisation de la métrique pour le modèle "Globe". La métrique proposée permet de préserver les éléments caractéristiques de la couleur pendant la simplification.

intermédiaire. Pour cette extension, deux problèmes doivent être résolus :

1. La précision de la couleur et de la géométrie doit être adaptée à chaque niveau de détail. Ainsi, à chaque itération de l'encodage, la prochaine opération parmi (1) la décimation, (2) la diminution de la précision de quantification de la géométrie et (3) la diminution de la précision de quantification de la couleur doit être déterminée de manière optimale.
2. La diminution de la précision de quantification de la couleur doit être encodée efficacement afin d'éviter un surcoût du codage important.

Notons que nous utilisons pour cette optimisation la méthode de compression basée sur la prédiction (section 3.2.2) pour encoder la couleur puisque la méthode basée sur la table de la couleur (section 3.2.3) nécessite un temps de calcul important dû notamment à l'étape de réduction du nombre de couleurs.

3.4.1 Changement de la précision de quantification de la couleur

Dans cette section, nous présentons notre méthode de réduction de la précision de la couleur. En amont de l'encodage, chaque composante $L^*a^*b^*$ est quantifiée en utilisant 8 bits. Généralement, cette précision n'est pas nécessaire pour les maillages intermédiaires grossiers.

Pour réduire d'un bit la quantification de la couleur, nous considérons cette opération comme un processus de fusion dans une structure d'octree, similairement à l'opération

appliquée pour la géométrie (section 3.2.3). Pendant le processus de codage, chaque groupe de huit cellules-filles est fusionné pour former une cellule-mère et l'indice de la cellule-fille d'origine est encodé pour chaque sommet.

Nous pouvons observer que, contrairement à la géométrie, de nombreux sommets ont les mêmes valeurs de couleur. Lors de la diminution de la précision de quantification, ces sommets vont donc avoir le même indice de cellule-fille. Afin de réduire le débit, nous utilisons un codeur pour chaque couleur, au lieu d'utiliser un codeur commun pour toutes les couleurs. Pour cela, nous diminuons d'abord la précision de quantification de la couleur des sommets. Ensuite nous traversons chaque sommet du maillage et si la couleur du sommet courant après la diminution de la précision est i , nous utilisons le codeur i pour encoder l'indice de la cellule-fille de ce sommet.

Dans la figure 3.11, nous illustrons le cas du codeur commun pour toutes les couleurs (a) et le cas d'un codeur par couleur (b). En utilisant un seul codeur commun, la distribution des indices des cellules-filles de tous les sommets a une forte chance d'être uniforme. Le codage entropique de cette distribution n'est donc pas efficace. Par contre, si on calcule cette distribution pour chaque couleur, cette distribution a tendance à avoir une entropie plus faible, ce qui permet d'améliorer le codage.

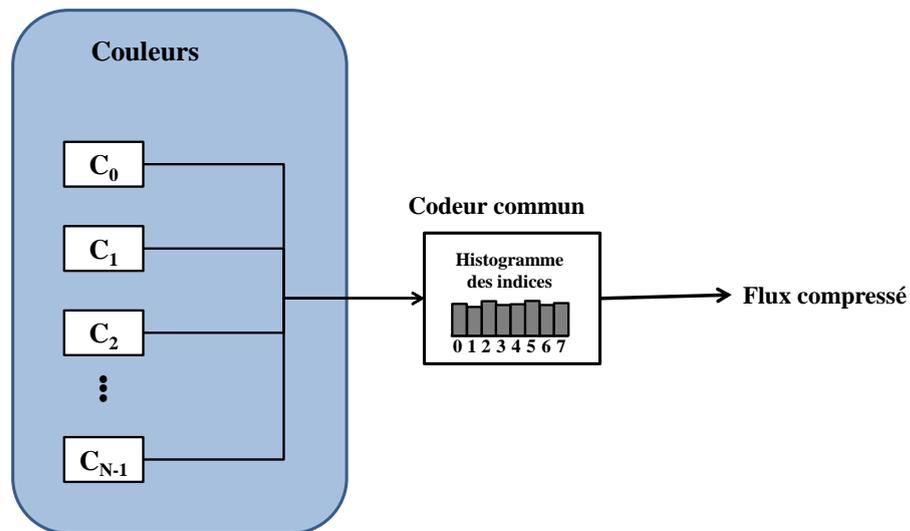
La figure 3.12 illustre le débit nécessaire en bps pour cette diminution de la précision de quantification pour le modèle "GIST-Monkey" (en haut) et pour le modèle "Radiateur" (en bas). Le niveau de détail 0 indique le niveau le plus fin, le niveau 1 est le niveau après une décimation, etc. On peut observer que l'utilisation de codeurs multiples permet d'encoder plus efficacement cette diminution de quantification que l'utilisation d'un seul codeur.

L'augmentation de la précision de quantification pendant la décompression effectue l'opération inverse ; on parcourt le maillage et si la couleur d'un sommet est j nous utilisons le décodeur j pour trouver l'indice de la cellule-fille de ce sommet. L'opération de l'augmentation de la précision (décodage) et celle de la diminution de la précision (encodage) sont appliquée sur le même maillage, ainsi aucune information supplémentaire est nécessaire.

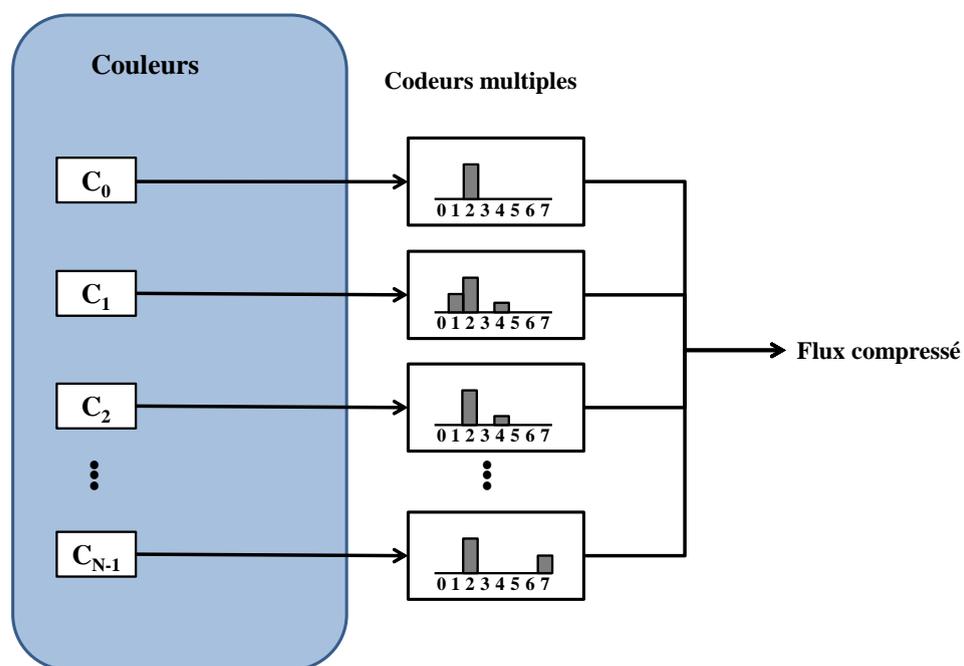
Notons que la diminution de la précision de quantification de la géométrie est réalisée de manière identique à notre méthode présentée dans la section 2.4.1.

3.4.2 Détermination optimale de la prochaine opération

Cette section est dédiée à notre méthode de détermination optimale de la prochaine étape. Cette méthode procède de manière similaire à celle utilisée pour un maillage

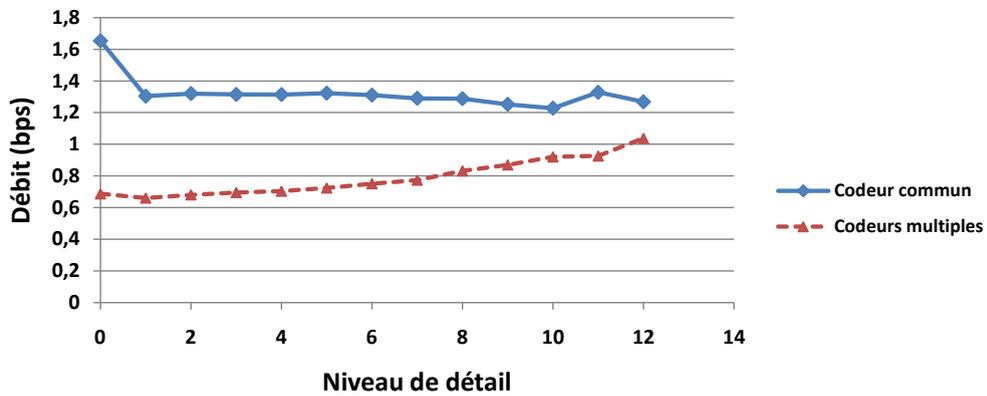


(a) Utilisation d'un codeur commun

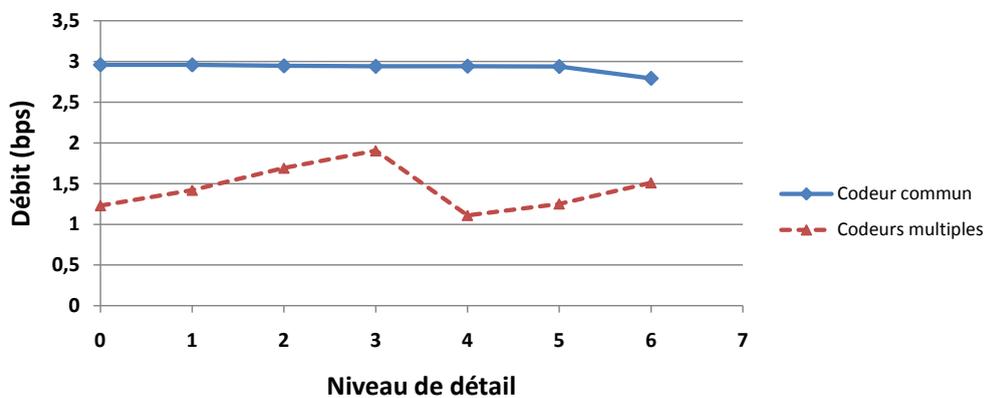


(b) Utilisation d'un codeur par couleur

FIGURE 3.11 – Schémas du codage de la diminution de la précision de quantification de la couleur. L'utilisation d'un codeur commun pour toutes les couleurs (a) est moins efficace que l'utilisation d'un codeur pour chaque couleur (b).



(a) GIST-Monkey



(b) Radiateur

FIGURE 3.12 – Le coût du codage du changement de la précision de quantification de la couleur (en bps) en fonction du niveau de détail pour le modèle "GIST-Monkey" et pour le modèle "Radiateur". L'utilisation de codeurs multiples (un codeur par couleur) est plus efficace que l'utilisation d'un codeur commun.

sans attributs de couleur. La différence principale est que la prochaine opération doit être choisie parmi 3 possibilités à chaque itération d'encodage : (1) la décimation, (2) la diminution de la précision de quantification de la géométrie et (3) la diminution de la précision de quantification de la couleur.

Pour déterminer la meilleure étape, nous comparons le rapport entre le débit nécessaire et la distorsion introduite pour chaque cas, $\frac{\Delta D_{déci}}{\Delta B_{déci}}$, $\frac{\Delta D_{géo}}{\Delta B_{géo}}$ et $\frac{\Delta D_{color}}{\Delta B_{color}}$, et l'opération dont la valeur du ratio est la plus petite est choisie comme l'opération suivante.

Pour mesurer la distorsion, nous utilisons la métrique de Roy et al. [RFK*06]. Cette métrique mesure la différence entre la couleur de chaque sommet d'un maillage et la couleur du point géométriquement le plus proche sur la surface de l'autre maillage. Ainsi, l'erreur mesurée par cette métrique reflète non seulement l'erreur de la couleur mais aussi l'erreur de la géométrie. Pour notre cas, nous mesurons la distorsion comme le maximum de deux distances RMS obtenu par cette métrique.

3.4.3 Détermination rapide et quasi-optimale de la prochaine opération

Dans cette section, nous proposons une méthode quasi-optimale d'optimisation du compromis débit-distorsion pour réduire le temps de calcul.

La procédure est similaire à la méthode utilisée pour un maillage sans attributs (section 2.4.3). Le but de cette méthode quasi-optimale est de retrouver le chemin parcouru par la méthode optimale en se basant sur une analyse des propriétés colorimétriques et géométriques. Plus concrètement, à chaque itération de l'encodage, la précision optimale de quantification de la géométrie q_G est estimée et si q_G est inférieure à la précision courante Q_G , la diminution de la précision de quantification de la géométrie est appliquée. De la même manière, la diminution de la précision de quantification de la couleur est appliquée lorsque sa précision estimée q_C est inférieure à la précision courante Q_C .

3.4.3.1 Estimation de la précision de quantification de la géométrie

Nous observons que la mesure de complexité géométrique K_G utilisée pour les maillages sans attributs couleur (equation 2.23) peut être employée, même si une mesure différente de distorsion est utilisée.

Dans la figure 3.13, nous illustrons les précisions optimales de quantification de la géométrie des maillages intermédiaires en fonction des valeurs de K_G correspondantes. Ces valeurs sont obtenues en appliquant notre méthode optimale à différents niveaux de 5 modèles. Au total, 89 points sont acquis et ces points nous servent de base d'apprentissage pour établir une équation permettant d'estimer la précision adaptée de quanti-

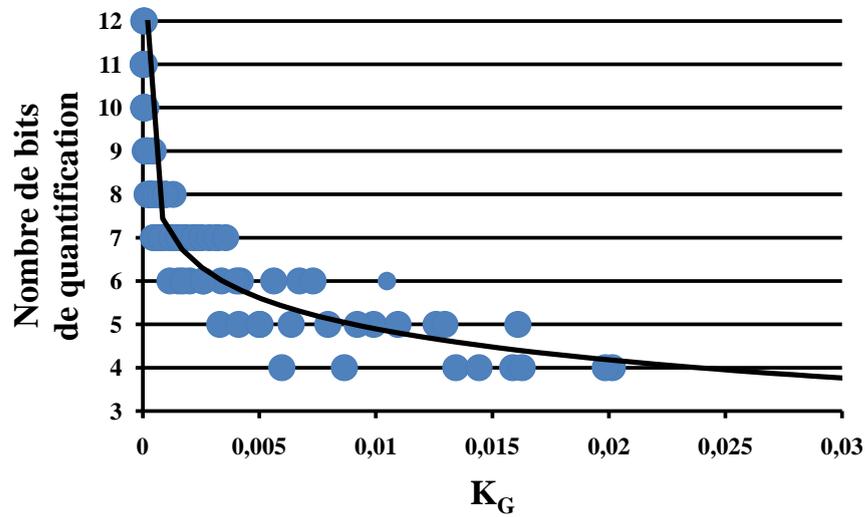


FIGURE 3.13 – Précisions optimales de quantification en fonction de K_G .

fication q_G . Nous appliquons un ajustement de type logarithmique sur ces données et nous obtenons :

$$q_G = [-1,03 \cdot \log(K_G) + 0,15] \quad (3.3)$$

Dans cette équation, $[]$ désigne l'opération d'arrondi à l'entier le plus proche.

On peut remarquer que les paramètres sont différents par rapport à l'équation (2.24), utilisée pour les maillages sans attributs de couleur. Les raisons sont : (1) l'utilisation d'autres modèles comme base d'apprentissage et (2) l'utilisation d'une autre métrique pour mesurer la distorsion.

3.4.3.2 Estimation de la précision de quantification de la couleur

Pour la détermination de la précision optimale de quantification de la couleur, nous utilisons deux métriques de complexité. Cette détermination semble être difficile avec une seule métrique, pour les raisons suivantes : (1) contrairement à la géométrie, les composantes de la couleur sont en général concentrées dans une petite portion de l'espace colorimétrique et la différence de couleur entre deux sommets adjacents peut être importante (discontinuité de la couleur) ; (2) la couleur sur une surface du maillage dépend de sa forme géométrique, puisque la couleur d'un point sur une face est obtenue en interpolant les couleurs des sommets de cette face.

Nos expériences ont montré que la précision optimale des maillages intermédiaires peut être déterminée si la précision initiale et la précision finale de la couleur sont obtenues en avance. Ainsi, notre première mesure de complexité K_{C1} est utilisée pour

déterminer les précisions de quantification initiale $q_{C_{init}}$ et finale $q_{C_{final}}$, en se basant uniquement sur les informations du maillage initial. A l'encodage, nous calculons d'abord $q_{C_{init}}$ et nous diminuons la précision courante de la couleur Q_C à $q_{C_{init}}$. Ensuite pendant l'encodage, la précision courante Q_C ne peut pas passer en dessous de $q_{C_{final}}$. La mesure K_{C1} est définie ainsi :

$$K_{C1} = \frac{VC_{moyenne}}{VC_{max}} \quad (3.4)$$

Dans cette équation, $VC_{moyenne}$ et VC_{max} désignent respectivement les mesures de variation moyenne et de variation maximale de la couleur. $VC_{moyenne}$ est calculée en moyennant les différences de couleur entre les deux sommets de toutes les arêtes du maillage et VC_{max} est le maximum de ces différences de couleur.

Dans les figures 3.14 et 3.15, nous illustrons respectivement le nombre de bits de quantification initiale et celui de quantification finale obtenus en appliquant notre méthode optimale sur 7 modèles. Nous appliquons un ajustement de type polynomial sur ces données, ainsi la précision de quantification initiale $q_{C_{init}}$ peut être estimée par l'équation suivante :

$$q_{C_{init}} = [-58,0 * K_{C1}^2 + 5,31 * K_{C1} + 7,81] \quad (3.5)$$

De la même manière, la précision de quantification finale $q_{C_{final}}$ peut être estimée comme suit :

$$q_{C_{final}} = [84,55 * K_{C1}^2 - 33,72 * K_{C1} + 7,82] \quad (3.6)$$

Les précisions initiale et finale étant calculées, nous avons besoin de déterminer la précision optimale de quantification de la couleur pour les maillages intermédiaires. Pour ce faire, nous considérons d'abord le nombre de sommets du maillage en conformité avec la mesure de complexité de la géométrie K_G . Nous prenons également en compte le degré de variation de la couleur sur la surface du maillage. Ce degré est estimé par le rapport entre $VC_{moyenne}$ et VC_{max} . Pour normaliser, nous tenons compte de l'aire de la surface.

La deuxième mesure de complexité K_{C2} est alors définie par :

$$K_{C2} = \frac{EC_{moyenne}}{EC_{max}} \times \frac{Aire}{\#S} \quad (3.7)$$

Dans cette équation, *Aire* et *#S* indiquent respectivement l'aire de la surface et le nombre de sommets.

En appliquant la méthode de détermination optimale sur 7 modèles, une base d'apprentissage contenant les données de précisions de quantification en fonction des va-

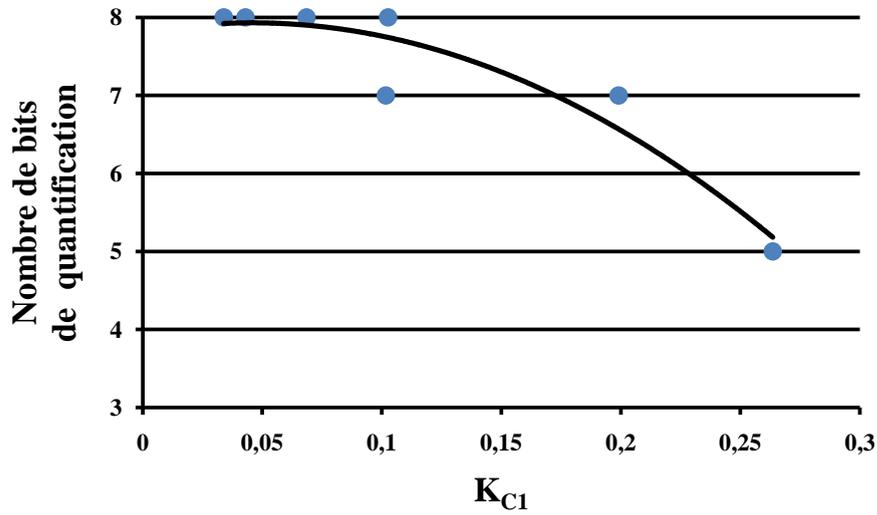


FIGURE 3.14 – Précision de quantification initiale de la couleur en fonction de K_{C1} pour différents modèles.

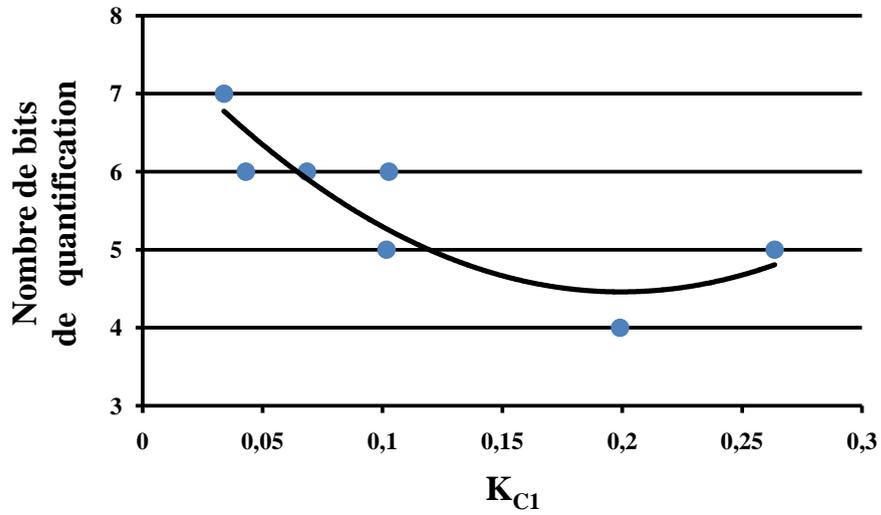


FIGURE 3.15 – Précision de quantification finale de la couleur en fonction de K_{C1} des différents modèles.

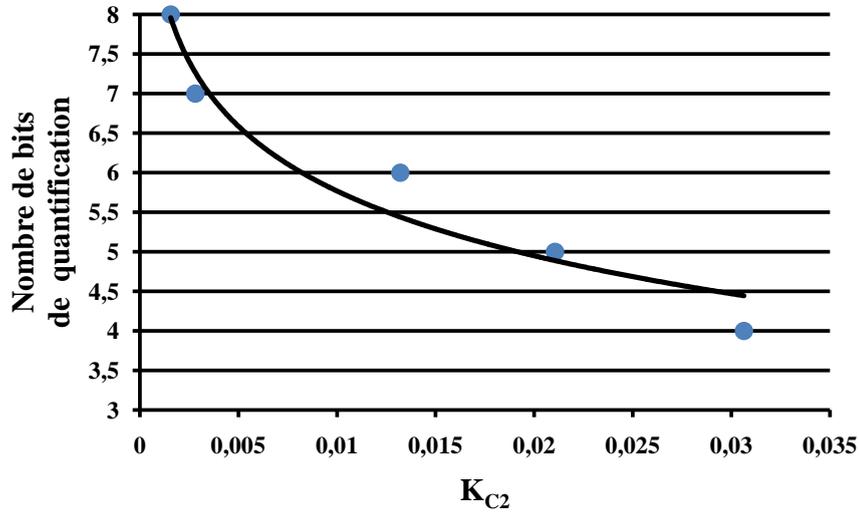


FIGURE 3.16 – Précision de quantification de la couleur en fonction de la valeur moyenne de K_{C2} .

leurs de K_{C2} correspondantes est obtenue. Pour l’ajustement, nous utilisons les valeurs moyennes de K_{C2} pour chaque précision de quantification, comme nous montre la figure 3.16. Un ajustement de type logarithmique nous permet d’estimer la précision de quantification $q_{C_{inter}}$ pour chaque maillage intermédiaire comme suit :

$$q_{C_{inter}} = [-1,18 * \log(K_{C2}) + 0,33] \quad (3.8)$$

En résumé, nous calculons d’abord $q_{C_{init}}$ et $q_{C_{final}}$ avec K_{C1} . La précision de la couleur Q_C est réduite à $q_{C_{init}}$. Puis, la précision optimale des maillages intermédiaires $q_{C_{inter}}$ est estimée en se basant sur K_{C2} et si $Q_C > q_{C_{inter}}$ et si $Q_C > q_{C_{final}}$, nous diminuons la quantification de la couleur.

Dans notre méthode quasi-optimale, nous devons choisir à chaque itération de l’encodage la prochaine opération entre la décimation, la diminution de précision de la géométrie et celle de la couleur. Notre stratégie pour cette sélection est la suivante : la décimation est choisie lorsque la diminution de la précision la géométrie et celle de la couleur ne sont pas appropriées ($q_{C_{inter}} \geq Q_C$ et $q_G \geq Q_G$). Quand la diminution de la précision de la géométrie et celle de la couleur sont possibles ($q_C < Q_C$ et $q_G < Q_G$), nous devons prendre une décision entre ces deux possibilités. Dans ce cas, nous donnons la priorité à la couleur. La raison est que l’estimation de la précision de la couleur est plus délicate que celle de la géométrie du fait qu’elle dépend de plus de paramètres (équations 3.5, 3.6 et 3.8) que celle de la géométrie (équation 3.3).

Notre méthode quasi-optimale peut être résumée par l’Algorithme 1 :

```

Calculer  $q_{C_{init}}$  (équation 3.5) et  $q_{C_{final}}$  (équation 3.6)
Initialiser la précision de quantification de la couleur  $Q_C$  à  $q_{C_{init}}$ 
tant que Nombre d'éléments du maillage > nombre défini par l'utilisateur faire
  Calculer  $q_{C_{inter}}$  (équation 3.8) et  $q_G$  (équation 3.3)
  si  $Q_C > q_{C_{inter}}$  et  $Q_C > q_{C_{final}}$  alors
    Diminuer d'un bit la précision de quantification de la couleur
  sinon
    si  $Q_G > q_G$  alors
      Diminuer d'un bit la précision de quantification de la géométrie
    sinon
      Décimer le maillage courant
    finsi
  finsi
fin

```

Algorithme 3.1: Notre méthode quasi-optimale pour l'optimisation du compromis débit-distorsion pendant l'encodage.

3.5 Résultats expérimentaux

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus par les méthodes proposées dans ce chapitre. Nous présentons le taux de compression de la couleur, les performances débit-distorsion et les temps de traitement. Les modèles utilisés sont illustrés dans la figure 3.17. Les modèles "GIST-Monkey" et "Nefertiti" sont fournis par GIST(Gwangju Institute of Science and Technology)¹, les modèles "Swirl" et "Globe" sont les données distribuées par Michael Garland² et les modèles "Radiateur, "Renfort" et "Enveloppe" sont fournis par l'EDF (Electricité de France).

3.5.1 Taux de compression de la couleur

Le tableau 3.1 liste les taux de compression sans pertes. La géométrie et la couleur sont quantifiées en utilisant respectivement 12 bits et 8 bits. Les débits de la couleur et ceux de la connectivité et de la géométrie (C+G) sont exprimées en bits par sommet (bps). Dans cette expérience, la métrique (section 3.3) n'est pas utilisée, puisque nous nous intéressons uniquement au taux de compression.

Généralement, les méthodes de compression progressive ne permettent pas d'encoder la couleur. Nous comparons notre méthode de prédiction avec celle de Yoon et al. (YKH 2006) [YKH06]. Cette méthode est utilisée dans le contexte de compression mono-résolution. Pour la comparaison, nous adoptons cette méthode de prédiction pour encoder la couleur et utilisons le même codeur pour la géométrie et la connectivité. D'abord,

¹<http://www.gist.ac.kr/>

²<http://mgarland.org/>

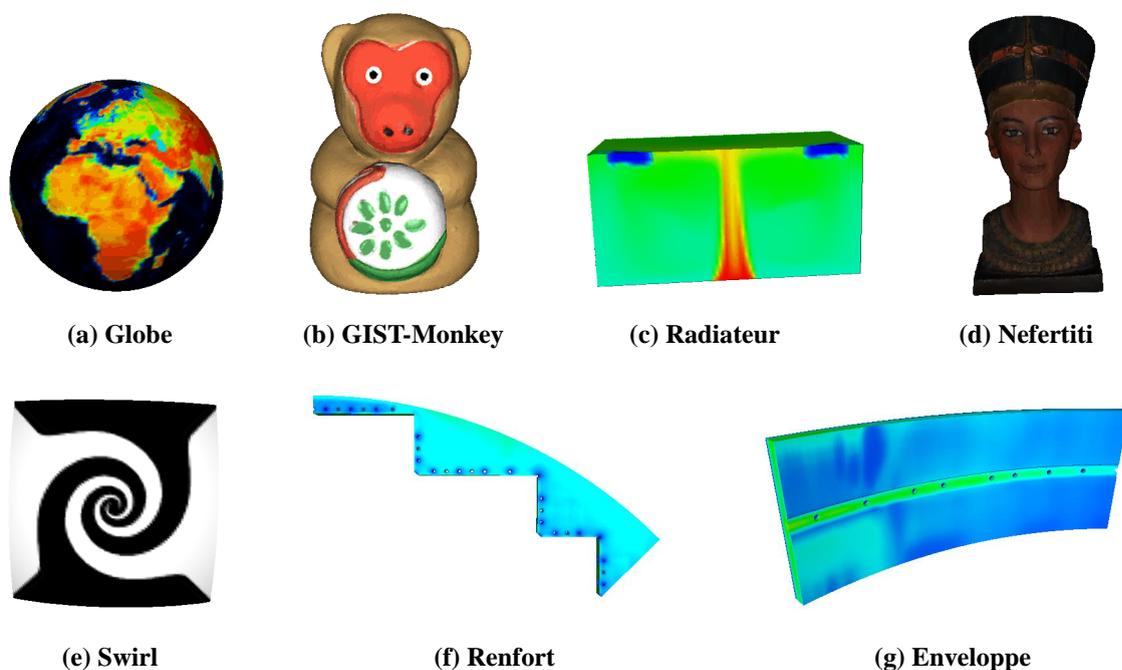


FIGURE 3.17 – Modèles testés.

on peut observer que notre méthode basée sur la prédiction et la méthode de Yoon et al. donnent des résultats similaires. Ces méthodes de prédiction sont efficaces en particulier pour les modèles ayant une variation dégradée de couleur, comme les modèles "GIST-Monkey", "Radiateur", "Swirl", "Renfort" et "Enveloppe". Notre méthode se révèle plus efficace que la méthode de Yoon et al. pour le modèle "Swirl", qui contient un nombre important de sommets situés sur des discontinuités de couleur.

Dans ce tableau, nous donnons également les taux de compression sans pertes de notre méthode basée sur la table de correspondance. K désigne le nombre de couleurs dans la table. Nous pouvons voir que plus K augmente, plus le débit diminue. En effet, pour parvenir à une compression sans pertes de la couleur, nous devons encoder la différence de couleur de chaque sommet avant et après la diminution du nombre de couleurs. Lorsque K augmente, le coût lié au codage des indices de couleur de chaque sommet et au codage de la table augmente, mais le coût lié à la restauration des couleurs exactes pour une compression sans pertes diminue. Généralement, l'augmentation du premier coût est plus faible que la diminution du deuxième coût, ce qui explique la diminution du coût total de codage de la couleur lorsque K augmente. Le taux minimal est obtenu lorsque K est maximal (i.e. K est égal au nombre de couleurs initial). Pourtant la performance débit-distorsion n'est pas optimale puisque plus d'information est nécessaire pour restaurer les maillages intermédiaires.

TABLEAU 3.1 – Comparaison du taux de compression sans pertes. Les chiffres sont en bps (bits par sommet).

Modèle	# Color	# S	C+G	YKH 2006	Méthodes proposées				
					Prédiction	Table de couleurs			
						K = 64	K = 256	K = 512	K = 1024
Globe	5 030	36 866	7,08	16,24	15,37	15,81	13,72	12,87	12,64
GIST-Monkey	6 669	50 505	18,74	6,51	5,96	8,65	8,27	7,22	6,96
Radiateur	535	16 002	4,9	6,39	7,03	10,32	8,24	7,97	-
Swirl	138	9 216	5,05	10,4	4,04	2,98	-	-	-
Renfort	695	190 540	9,86	10,73	11,18	15,17	11,18	8,88	-
Enveloppe	423	125 587	11,42	8,78	8,17	13,22	9,33	-	-

3.5.2 Performance débit-distorsion

Les figures 3.18, 3.19, 3.20 et 3.21 présentent respectivement les courbes débit-distorsion des modèles "Radiateur", "Enveloppe", "GIST-Monkey" et "Nefertiti". La distorsion est mesurée en utilisant la métrique de Roy et al. [RFK*06] et elle est exprimée en maximum de deux distances RMS. La géométrie des modèles "Radiateur" et "Nefertiti" est quantifiée avec 10 bits et les autres modèles sont quantifiés avec 12 bits. Le débit inclut les coûts de la connectivité, de la géométrie et de la couleur. Notons que nous utilisons notre méthode basée sur la prédiction pour encoder la couleur. Afin d'évaluer l'amélioration du compromis débit-distorsion apportée par l'adaptation de la quantification et par l'utilisation de la métrique, nous comparons nos méthodes basées sur la détermination optimale (Optimal) et sur la détermination quasi-optimale (Quasi-optimal) par rapport à une version de notre méthode de compression sans l'adaptation de quantification ni la métrique, que nous nommons une méthode initiale (Initial). Cette méthode initiale utilise les mêmes codeurs pour la connectivité et la géométrie et utilise la méthode basée sur la prédiction pour encoder la couleur.

D'abord, nous pouvons observer que notre méthode quasi-optimale produit de résultats très similaire à notre méthode optimale. Parmi ces modèles testés, le modèle "Enveloppe" n'a pas été utilisé pour établir les équations pour estimer les précisions de quantification dans la méthode quasi-optimale (équations 3.3, 3.5, 3.6 et 3.8). Notre méthode basée sur la détermination quasi-optimale permet donc de déterminer correctement les précisions de quantification pour des modèles qui n'appartiennent pas à la base d'apprentissage utilisée. Pour le modèle "Radiateur", le taux de compression sans pertes a augmenté par rapport à la méthode initiale. La raison est que ce modèle étant initialement régulier, l'utilisation de la métrique introduit un nombre important de codes incidents, ce qui fait augmenter le taux de compression par rapport à la méthode initiale.

Dans la figure 3.22, nous montrons des maillages intermédiaires du modèle "Radiateur" à débits similaires pour notre méthode optimale (Optimal) et notre méthode

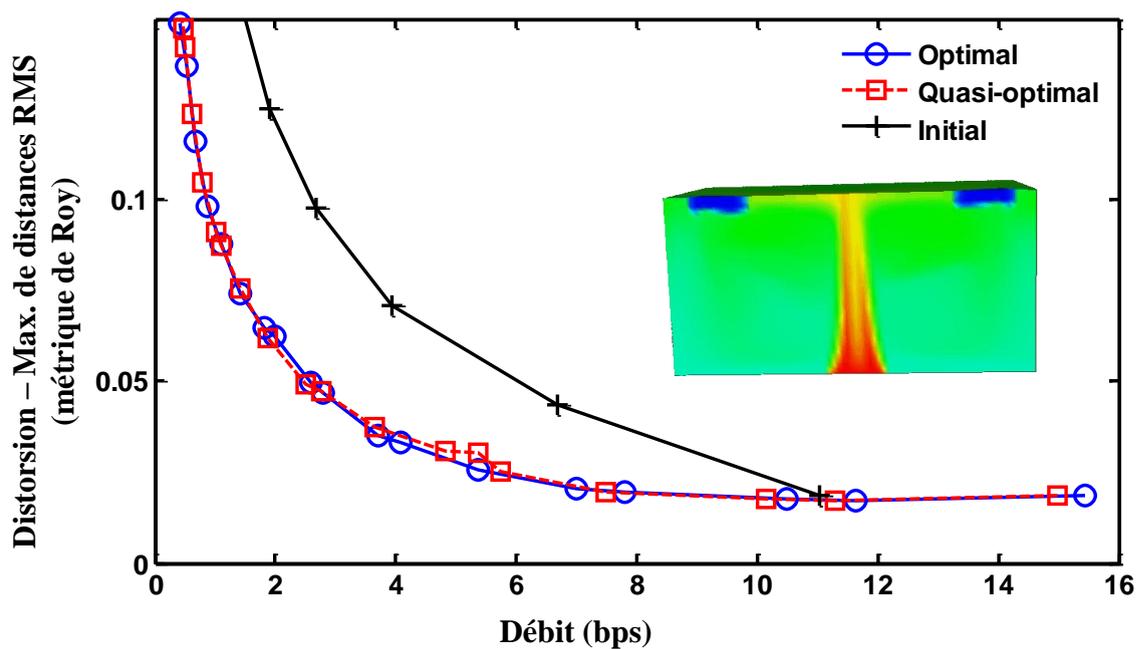


FIGURE 3.18 – Courbe débit-distorsion du modèle "Radiateur".

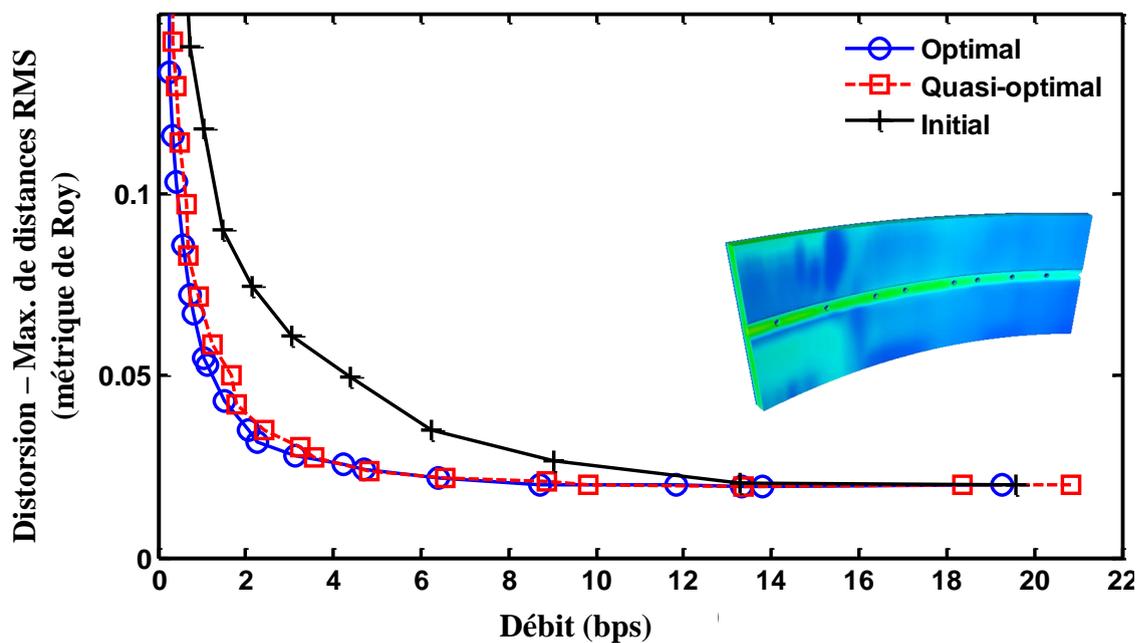


FIGURE 3.19 – Courbe débit-distorsion du modèle "Enveloppe".

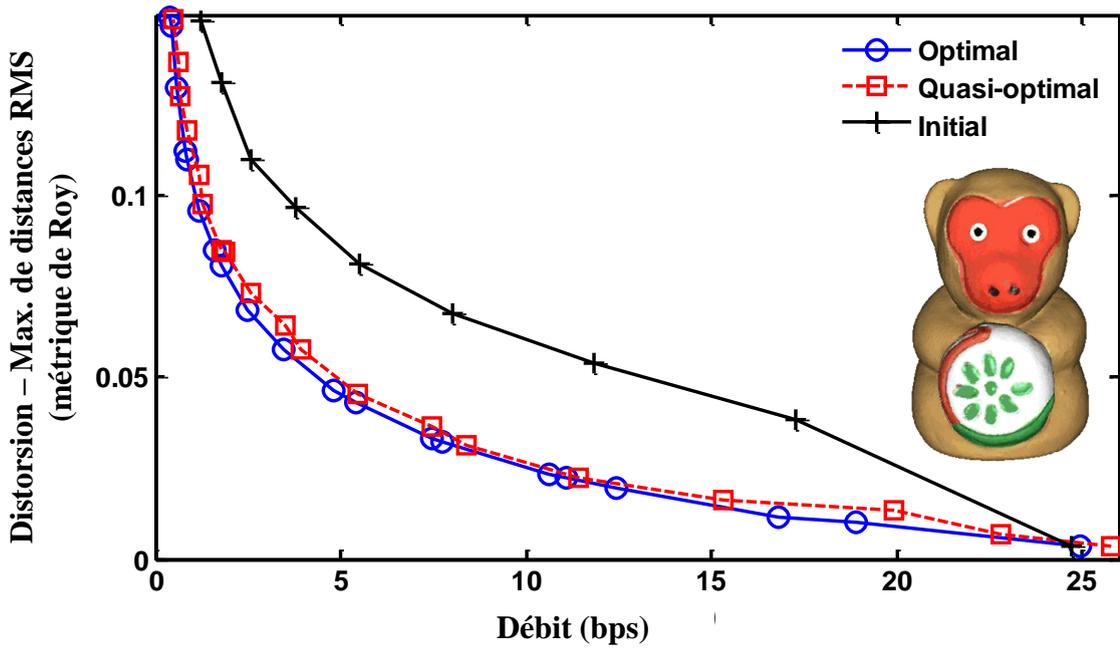


FIGURE 3.20 – Courbe débit-distorsion du modèle "GIST-Monkey".

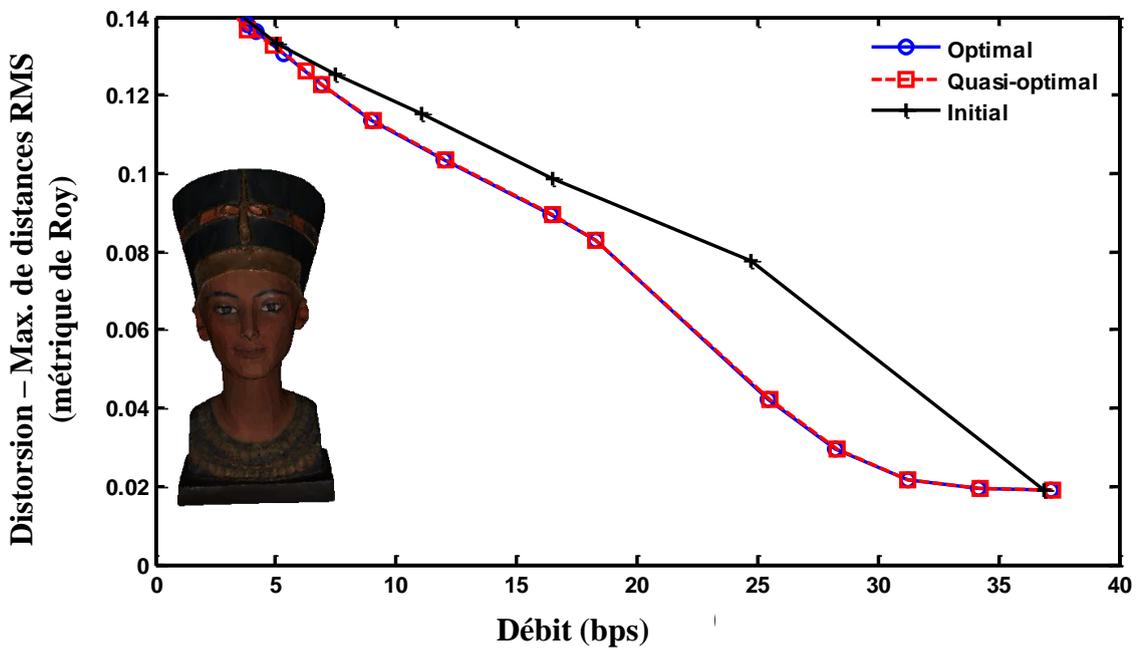


FIGURE 3.21 – Courbe débit-distorsion du modèle "Nefertiti".

TABLEAU 3.2 – Comparaison du temps d'exécution de l'encodage en secondes.

Model	# S	Q_G	Méthode initiale	Méthode optimale	Méthode quasi-optimale
Swirl	9 216	10	0,2	22,1	0,4
Nefertiti	10 013	10	0,3	35,6	1,2
Radiator	16 002	10	0,4	49,7	0,5
Globe	36 866	12	1,1	175,8	2,6
Gist-Monkey	67 039	12	1,5	192,4	2,6
Enveloppe	125587	12	3,9	758,9	5,0
Renfort	190 540	12	6,1	1495,9	6,8

initiale (Initial). Dans cette figure, nous utilisons une métrique géométrique d'Alliez et Desbrun [AD01a] qui est basée sur le volume pour préserver la forme initiale. Nous pouvons voir que pour tous les débits, l'utilisation de l'adaptation de quantification et de notre métrique permet d'améliorer significativement la qualité visuelle.

3.5.3 Temps de traitement

Les tableaux 3.2 et 3.3 montrent les temps de calcul de nos méthodes pour l'encodage et le décodage : la méthode initiale sans l'adaptation de quantification ni métrique, la méthode optimale et la méthode quasi-optimale. Q_G désigne le nombre de bits de quantification de la géométrie. Nous pouvons observer que notre méthode optimale exige un temps de calcul très important lors de l'encodage dû principalement à la mesure de distorsion avec l'outil de Roy et al. [RFK*06]. Par rapport à la méthode initiale, cette méthode nécessite un temps de calcul 150 fois supérieur en moyenne. La méthode quasi-optimale permet de réduire ce temps de calcul considérablement. Cette méthode prend seulement 2 fois plus de temps pour l'encodage pour les maillages comportant peu d'éléments et nécessite un temps de calcul quasi identique pour des gros maillages (plus de 200 000 sommets). Le temps supplémentaire est dû aux étapes de diminutions de la précision de quantification et à l'utilisation de la métrique.

Le temps de traitement de notre méthode optimale est très similaire à celui de notre méthode quasi-optimale.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode de compression pour les maillages avec attributs de couleur. Après avoir proposé deux méthodes pour encoder la couleur associée aux sommets, nous avons introduit notre méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion. Cette méthode consiste à adapter la précision de quantification de

TABLEAU 3.3 – Comparaison du temps d'exécution du décodage en secondes.

Model	# S	Q_G	Méthode initiale	Méthode optimale	Méthode quasi-optimale
Swirl	9 216	10	0,3	0,5	0,5
Nefertiti	10 013	10	0,3	1,0	1,0
Radiator	16 002	10	0,3	0,4	0,4
Globe	36 866	12	0,6	3,2	3,1
Gist-Monkey	67 039	12	1,5	3,2	3,2
Enveloppe	125587	12	3,0	5,0	4,9
Renfort	190 540	12	5,4	5,9	5,9

la géométrie ainsi que celle de la couleur à la complexité de chaque maillage intermédiaire. La version optimale de cette méthode est basée sur une mesure de distorsion. Bien que cette méthode puisse apporter une amélioration, le temps de calcul est très long. Afin de réduire ce temps de calcul, nous avons présenté une deuxième version basée sur l'estimation de la précision de quantification à l'aide d'un apprentissage. Afin d'améliorer la qualité visuelle, nous avons également présenté une métrique, permettant de préserver les éléments caractéristiques de manière adaptative pour chaque maillage intermédiaire.

L'ordre des étapes effectuées pendant l'encodage est très important dans la performance débit-distorsion et cet ordre est déterminé suivant un critère local dans notre méthode. Il serait intéressant de définir cet ordre d'après un critère global, ce qui pourrait éventuellement améliorer davantage la performance débit-distorsion. Pour ce faire, on pourrait comparer les résultats de tous les ordres possibles afin de choisir le meilleur, et ensuite en tirer une règle afin de réduire le temps de calcul. Dans l'algorithme actuel, la précision de quantification est identique pour tous les sommets d'un maillage. Afin d'améliorer la performance débit-distorsion, on pourrait leur attribuer une précision différente, suivant la forme ou la couleur de la surface locale.

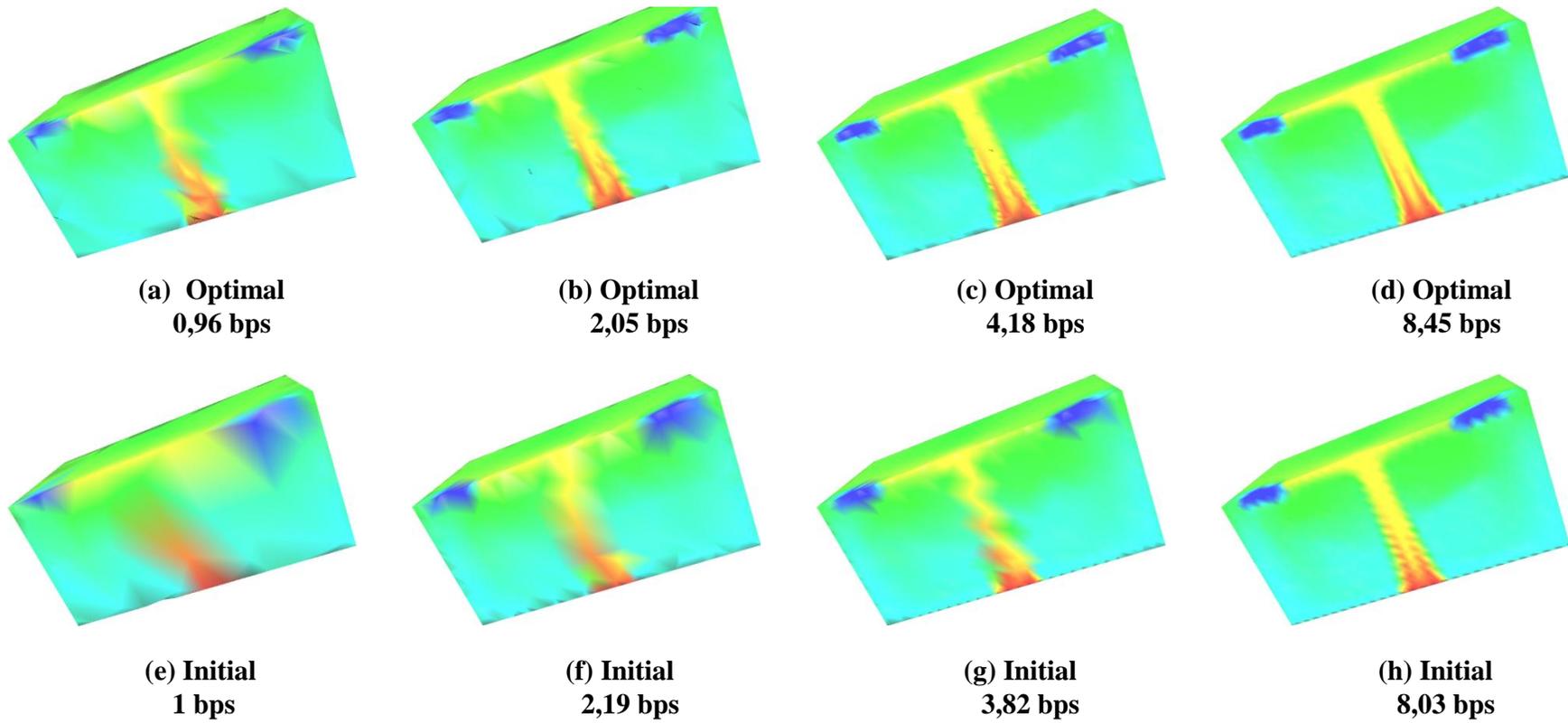


FIGURE 3.22 – Comparaison des modèles intermédiaires pour des débits similaires entre notre méthode optimale et notre méthode initiale (sans adaptation de quantification et sans métrique).

Compression progressive conjointe au tatouage réversible

Sommaire

4.1	Introduction	92
4.2	Etat de l'art	94
4.2.1	Méthodes de tatouage robuste	94
4.2.2	Méthodes de tatouage réversible	95
4.2.3	Méthodes conjointes de compression et tatouage	97
4.3	Méthode conjointe de compression progressive et tatouage	99
4.3.1	Sélection de la primitive de tatouage	99
4.3.2	Insertion du tatouage	100
4.3.3	Extraction du tatouage	104
4.3.4	Traitement du cas particulier	105
4.3.5	Réversibilité complète et nouvelle méthode de prédiction pour la géométrie	105
4.3.6	Augmentation de la capacité de tatouage	109
4.4	Résultats expérimentaux	112
4.4.1	Evaluation du taux de compression, de la distorsion et de la capacité	113
4.4.2	Evaluation de la robustesse	115
4.4.2.1	Robustesse contre le bruit du canal	115
4.4.2.2	Robustesse contre les attaques intentionnelles	117
4.5	Conclusion	120

Dans ce chapitre, nous présentons une méthode conjointe de tatouage réversible et de compression progressive pour les maillages 3D. Pour la compression, nous utilisons notre méthode sans l'adaptation de la quantification (chapitre 2). Notons que la méthode de compression avec l'adaptation de la quantification pourrait être utilisée de la même manière. Dans cette méthode, un tatouage dit réversible est inséré dans chaque niveau de détail afin que (1) chaque maillage intermédiaire soit protégé par cette information de copyright pendant la transmission et l'échange sur le réseau, et (2) seuls les utilisateurs autorisés soient capables de reconstruire le modèle original de manière exacte en supprimant la déformation induite par l'insertion du tatouage à chaque raffinement du maillage. Pour insérer le tatouage, la méthode proposée modifie la géométrie en utilisant une technique de décalage de classes d'histogramme (*histogram bin shifting* en anglais). Nous montrerons que cette méthode de tatouage est robuste contre diverses attaques géométriques, puisqu'une propriété statistique est utilisée comme primitive de tatouage. Afin de réduire le surcoût de codage de la géométrie induit par l'insertion du tatouage, nous proposons également une nouvelle méthode de prédiction.

4.1 Introduction

Une méthode de compression progressive permet de transmettre de manière efficace des modèles 3D et aussi de les adapter aux différentes ressources des clients. Pendant l'échange de ces données à travers le réseau, il est nécessaire de protéger tous les niveaux de détails, puisque chaque niveau peut être intercepté et distribué illégalement par un pirate. Pour cette raison, le tatouage et la compression doivent être effectués conjointement pour une transmission efficace et sécurisée.

A l'heure actuelle, il existe peu de méthodes permettant de réaliser conjointement le tatouage et la compression, principalement à cause de propriétés opposées de ces deux techniques; l'insertion itérative du tatouage à chaque étape intermédiaire peut introduire une déformation sérieuse de la géométrie et peut également augmenter de manière significative le taux de compression. Inversement, la compression progressive peut perturber l'extraction correcte des bits de tatouage insérés. Comme le maillage est transmis de façon progressive jusqu'à un certain niveau de détail (pas nécessairement le niveau le plus fin), la marque doit être également lisible dans tous les niveaux intermédiaires. En d'autres termes, le tatouage doit être robuste à la simplification itérative effectuée lors de la compression progressive, ce qui n'est pas souvent le cas.

Ces problèmes peuvent être résolus en intégrant le tatouage dans le mécanisme de

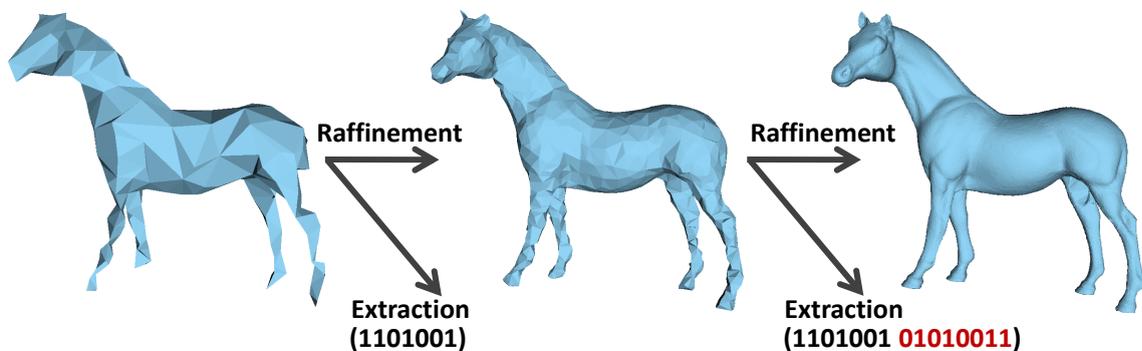


FIGURE 4.1 – Un exemple de raffinement progressif et d'extraction du tatouage.

compression progressive et cette combinaison de tatouage et de compression a également plusieurs avantages :

- l'intégration du processus du tatouage dans chaque étape intermédiaire de compression progressive permet d'extraire de manière exacte une partie des bits de tatouage à chaque itération de raffinement. Autrement dit, le tatouage inséré est robuste contre la modification géométrique apportée par le processus de compression progressive.
- un système conjoint est en général plus efficace qu'un système séparé de tatouage et de compression en termes de temps de calcul.

Dans notre méthode, une technique appelée décalage de classes d'histogramme (*histogram bin shifting*) est utilisée pour insérer les bits du tatouage. Lors de l'encodage, à chaque itération de décimation, les sommets du maillage sont séparés en deux ensembles (ceux qui vont être enlevés et ceux qui vont rester après la prochaine étape de décimation), et un histogramme de la distribution de la norme des sommets est calculé pour chaque ensemble. Ensuite, nous divisons ces histogrammes en plusieurs classes et les modifions en décalant les classes pour insérer un bit d'information. Ce tatouage est réversible dans le sens que la déformation géométrique induite par l'insertion du tatouage peut être supprimée lors de l'extraction du tatouage pendant la décompression. Cette propriété est particulièrement adaptée à la compression sans pertes.

La figure 4.1 illustre le principe global de notre algorithme. Pendant la décompression, le raffinement de maillage ainsi que l'extraction de la marque sont réalisés progressivement et conjointement.

4.2 Etat de l'art

Dans l'état de l'art qui suit, nous présentons les méthodes de tatouage robuste, les méthodes de tatouage réversible, et les méthodes conjointes de compression et de tatouage.

4.2.1 Méthodes de tatouage robuste

Bien que la première méthode ait été proposée il y a une quinzaine d'années par Ohbuchi et al. [OMA97], la recherche dans le domaine du tatouage de maillage 3D en est encore à un stade précoce; en effet, même si un grand nombre de méthodes ont été introduites jusqu'à ce jour [WLDB08], peu d'entre elles sont robustes (capables de résister aux différents types d'attaques à la fois géométrique et topologique) et aveugles (le modèle original n'est pas nécessaire à l'extraction), tandis que ces deux caractéristiques sont essentielles pour la protection du droit d'auteur.

Yu et al. [YIK03] insèrent chaque bit sur un ensemble d'éléments du maillage pour renforcer la robustesse. Une clé spéciale est utilisée pour générer des régions de sommets, cette clé est nécessaire pour que le décodeur puisse retrouver les régions. Chaque sommet d'une région est déplacé de manière identique pour insérer un bit et cette insertion redondante permet d'obtenir une bonne robustesse. Pourtant, cette méthode nécessite le maillage original pour l'extraction, ce qui la rend non-aveugle. Benedens [Ben99] insère un bit en modifiant la direction de la normale moyenne des triangles d'une région. Cette méthode est robuste contre la simplification du maillage, mais le maillage original est requis à l'extraction. Il existe également des méthodes robustes basées sur un descripteur de forme pour insérer un tatouage robuste. Zafeirou et al. [ZTP05] et Cho et al. [CPJ07] ont proposé des méthodes basées sur des modifications d'histogrammes. Dans [ZTP05], les coordonnées des sommets sont d'abord converties en coordonnées sphériques et des régions sont générées en regroupant les sommets suivant leurs valeurs d'une coordonnée angulaire. Ensuite, un bit est inséré dans chaque région en modifiant l'histogramme de l'erreur de prédiction de la composante radiale. Dans la méthode de Cho et al. [CPJ07], l'histogramme des normes des sommets est d'abord calculé. Ensuite cet histogramme est divisé en plusieurs classes et un bit est inséré dans chaque classe en modifiant légèrement l'espérance ou la variance à l'aide d'une fonction d'*histogram mapping*. Ces deux méthodes basées sur des histogrammes sont aveugles et également robustes contre diverses attaques géométriques et contre la simplification. Une autre méthode basée sur un descripteur de forme est proposée par Wang et al. [WLDB11]. Cette méthode robuste est aveugle est basée sur les moments volumiques de la forme. Après la décomposition du maillage en plusieurs régions, le moment volumique de

chaque région est modifiée pour embarquer un bit. Une fonction de masque est également utilisée afin de dissimuler la discontinuité géométrique entre les régions. Cayre et al. [CRAS*03] ont proposé une méthode robuste et aveugle qui modifie les coefficients de basses et de moyennes fréquences, en reposant sur la méthode de décomposition spectrale de Taubin [Tau95]. Dans [YI10], l'histogramme des coordonnées laplaciennes est modifié pour insérer le tatouage. Un bit est inséré pour chaque paire de classes en ajustant le rapport des nombres d'éléments entre deux classes suivant le bit à insérer. Différemment des autres méthodes, cette méthode est aussi robuste à la modification de la pose (*editing*) des modèles 3D (mais pas aux changements de connectivité). Une autre méthode robuste contre la même attaque est proposée dans [LCLL10]. Konstantinides et al. [KMD*09] insèrent le tatouage en modifiant les coefficients des harmoniques sphéroïdales, alors que Liu et al. [LPGo8] insère un tatouage robuste et aveugle en modifiant les amplitudes des coefficients spectraux calculés avec [VLo8]. Praun et al. [PHF99] utilisent la méthode de décomposition multi-résolution de [Hop96] pour insérer le tatouage dans les basses fréquences et dans les parties saillantes du maillage. L'insertion se réalise à l'aide d'une fonction de modulation dans l'espace spatial. Comme l'algorithme de base utilise l'information de la connectivité pour la décomposition, cette méthode est fragile contre les attaques sur la connectivité. De plus cette méthode est non aveugle.

Nous proposons une méthode aveugle et robuste aux attaques géométriques. De plus, cette méthode est réversible, ce qui signifie que lorsque le tatouage est extrait, la forme originale (non déformée) est récupérée. Dans la section suivante, nous présentons les méthodes de tatouage réversible.

4.2.2 Méthodes de tatouage réversible

Il existe de nombreuses méthodes de tatouage réversible pour l'image 2D. La première catégorie de ces méthodes est basée sur un schéma de compression [CSTE05, FGD02]. Celik et al. [CSTE05] modifient les bits de poids faible des pixels d'un bloc pour insérer un bit. Les auteurs séparent d'abord le bloc en un bloc de bits de poids fort et en un bloc de bit de poids faible. Ensuite une méthode de compression sans pertes est utilisée pour représenter le bloc de bits de poids faible avec un nombre de pixels réduit et pour utiliser les pixels vides générés pour insérer le tatouage. L'image tatouée finale est obtenue en assemblant les deux blocs. A l'extraction, chaque bloc est divisé en deux blocs de manière similaire à l'insertion et la décompression permet de retrouver le bit et restaurer de manière exacte l'image originale. Une autre méthode basée sur un schéma de compression est proposée par Fridrich et al. [FGD02]. La capacité des méthodes de cette

catégorie est relativement haute mais elles sont fragiles puisqu'une légère modification peut perturber significativement l'extraction du tatouage. Puech et al. [PRDM07] ont introduit une autre méthode réversible basée sur la compression. Une image est d'abord décomposée en deux sous-images. La sous-image constituée des bits de poids fort de l'image originale est encodée par *Run-length encoding* pour créer des "espaces" pour insérer un tatouage réversible. L'image finale obtenue en assemblant ces deux sous-images est ensuite cryptée. La caractéristique la plus importante de cette méthode est l'utilisation d'une procédure unique pour la compression, le tatouage et le cryptage, permettant de réduire le temps de calcul de manière significative.

Les méthodes [Tiao3, Alao4, TR07] sont basées sur l'expansion de différence. Dans la méthode de Tian [Tiao3], un bit est inséré pour chaque paire de pixels en modifiant les bits de poids faible. D'abord, la valeur moyenne et la différence sont calculées pour chaque paire. La différence est ensuite modifiée en fonction du bit à insérer et les valeurs de pixels sont obtenues avec la valeur moyenne et la différence modifiée. De cette manière, la valeur moyenne et la différence des pixels modifiés permettent de retrouver les pixels originaux et le tatouage. Plus tard, une extension de cette méthode est proposée par Alattar [Alao4]. Dans cette méthode, un bit est inséré dans un vecteur de pixels au lieu d'une paire de pixels afin d'améliorer l'imperceptibilité et de réduire la complexité en temps. Cette méthode possède une bonne capacité puisque plusieurs bits peuvent être insérés dans un même vecteur de pixels. Une autre extension est proposée par Thodi et Rodriguez [TR07]. Cette méthode qui combine l'expansion de différence avec une technique de décalage d'histogramme permet d'améliorer la capacité et la qualité de l'image tatouée par rapport à la méthode de Tian. Ces méthodes basées sur l'expansion de différence sont aveugles. Par contre elles sont fragiles à toutes sortes d'attaques.

Il existe également des méthodes de tatouage réversible basées sur le décalage de classes d'histogramme (*histogram bin shifting* en anglais). De Vleeschouwer et al. [DDM03] ont proposé une méthode de tatouage robuste, aveugle et réversible. Cette méthode découpe d'abord l'image en plusieurs blocs. Puis, les pixels de chaque bloc sont séparés en deux ensembles égaux de manière aléatoire, et un histogramme de luminance de chaque ensemble est calculé. Ensuite un bit est inséré dans chaque bloc en décalant ces histogrammes de luminance. Afin d'éviter le débordement de l'histogramme de luminance (la valeur de luminance est comprise entre 0 et 255) dû au décalage, l'histogramme est projeté sur une représentation circulaire. L'insertion du tatouage en décalant les histogrammes applique une rotation du centre de masse dans cette représentation circulaire, et le sens de l'angle formé par les deux centres de masse avec le centre de la représentation circulaire permet de retrouver le bit inséré à l'extraction. Cette méthode est

plus robuste que les autres méthodes au prix d'une capacité réduite. Ni et al. [NSA*08] ont proposé une extension de [DDM03], pour obtenir une meilleure robustesse contre la compression JPEG.

Pour les maillages 3D, il existe relativement peu de méthodes de tatouage réversible. Wu et Dugelay [WDo8] ont étendu l'approche basée sur l'expansion de différence pour les maillages. Pendant le parcours du maillage, le tatouage est inséré en modifiant la différence des positions entre le sommet courant et le sommet précédent. Cette méthode a une bonne capacité puisque trois bits peuvent être insérés par sommet (1 bit pour chaque composante x , y et z). Par contre la géométrie est fortement déformée et le tatouage inséré est fragile. Une extension est proposée par Wu et Wang [WW09] afin d'améliorer la qualité visuelle du maillage après le tatouage. Lu et Li [LL08] ont présenté une méthode réversible basée sur la quantification vectorielle. Cette méthode insère le tatouage en modifiant la règle de prédiction pendant le processus de la quantification. Bien que cette méthode possède une bonne capacité, cette méthode est vulnérable aux attaques.

Notre méthode de tatouage est réversible et elle est basée sur le décalage de classes d'histogramme. De plus, notre méthode est conjointe à la compression progressive. La section suivante donne un état de l'art sur les méthodes conjointes de compression et de tatouage.

4.2.3 Méthodes conjointes de compression et tatouage

Afin d'être robuste à la déformation provoquée par la compression, les méthodes pour l'image 2D insèrent généralement le tatouage pendant le processus de compression. Xie et Arce [XA98] ont proposé une méthode aveugle basée sur la transformée en ondelettes discrète (TOD). Pour insérer un bit, les auteurs modifient la médiane de trois coefficients d'ondelettes successifs de basse fréquence. Les coefficients de la région significative et locale sont choisis pour le tatouage pour assurer une bonne robustesse. Seo et al. [SKP*01] ont introduit une approche non aveugle qui insère le tatouage pendant le processus de *lifting* de la TOD. Cette méthode sélectionne des fréquences caractéristiques pour que le tatouage ne soit pas facilement supprimable. La méthode robuste et aveugle de Su et al. [SWK01] insère le tatouage en modifiant les coefficients significatifs d'ondelettes obtenus par EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation). Cette méthode permet d'extraire de manière progressive les bits du tatouage au cours du décodage progressif de JPEG 2000. Wong et Au [WAO2] ont proposé une méthode aveugle de tatouage pour une image compressée par JPEG. Leur méthode insère le tatouage dans un

ensemble de vecteurs obtenus par la transformée en cosinus discrète, en utilisant une méthode d'étalement de spectre. De plus, le tatouage est inséré itérativement pour augmenter la robustesse et la qualité de l'image. Dans [CFBo6], Caldelli et al. ont introduit une méthode fragile destinée à l'authentification et la localisation d'attaque. Le tatouage est inséré en modifiant le processus de quantification en se basant sur la méthode fragile de Fridrich et al. [FGDo2]. Le message est inséré dans les bits de poids faible, et cette méthode permet de contrôler la distorsion causée par le tatouage. Puech et Rodrigues [PRo4] ont proposé une méthode conjointe de compression, de tatouage et de cryptage pour les images médicales. Une image est d'abord cryptée en utilisant *stream cipher* qui est robuste à la compression JPEG. Afin de transmettre en sécurité la clé utilisée pour le cryptage, les auteurs utilisent une méthode de tatouage pour insérer l'information de la clé dans l'image cryptée. Le domaine fréquentiel est utilisé pour le tatouage afin d'obtenir une bonne robustesse contre la compression.

Il existe peu de méthodes conjointes pour les maillages. Cho et al. [Choo7] ont proposé une méthode pour une séquence de maillages ayant une connectivité constante. Cette méthode est basée sur la méthode de compression [CVP*10] qui permet de transmettre une séquence de maillages de manière progressive dans le domaine spatial et dans le domaine temporel à l'aide de la transformée en ondelettes. Pour insérer un bit, les auteurs modifient l'histogramme des coefficients de haute fréquence d'une séquence temporelle. Cette méthode est robuste contre les attaques géométriques, mais elle est fragile contre les attaques sur la connectivité. De plus, le tatouage ne peut pas être extrait correctement avant la transmission totale de la séquence, puisque tous les coefficients temporels sont nécessaires à l'extraction. Chen et Chen [CC10] ont proposé une méthode conjointe de compression progressive et de tatouage pour des maillages statiques. En se basant sur la méthode de compression progressive de Hoppe [Hop96], les auteurs insèrent un bit pour chaque sommet en modifiant légèrement sa normale pendant l'encodage. Contrairement à [Choo7], cette méthode permet d'extraire progressivement les bits du tatouage, simultanément à la décompression progressive. La capacité de cette méthode est haute (à peu près un bit par sommet). Par contre cette méthode est fragile et la déformation géométrique induite par l'insertion du tatouage n'est pas prise en compte pour optimiser le codage.

Notre méthode conjointe est robuste grâce à l'utilisation d'une propriété statistique et de plus elle est réversible. Une méthode de prédiction adaptée est aussi proposée afin de réduire le surcoût engendré par la modification de la géométrie par l'insertion du tatouage.

4.3 Méthode conjointe de compression progressive et tatouage

Pour notre méthode conjointe, nous utilisons notre méthode de compression progressive sans l'adaptation de quantification (chapitre 2).

Pour insérer les bits de tatouage pendant le processus de l'algorithme de compression progressive, nous considérons une technique de tatouage réversible, qui est principalement utilisée dans le contexte où l'intégrité des données originales doit être garantie.

Dans une approche de compression progressive, le modèle est successivement transmis et reconstruit pendant le décodage. Ainsi, il est raisonnable d'extraire également progressivement le tatouage au lieu d'attendre la transmission et la reconstruction totale. Cette extraction progressive peut être réalisée en insérant le tatouage de façon répétitive dans chaque niveau de détail au cours de l'encodage.

Toutefois, l'application itérative des méthodes classiques de tatouage peut déformer de plus en plus sévèrement la forme du maillage, et le maillage ainsi obtenu à la fin de la transmission ne présenterait aucun intérêt pour l'utilisateur. Ce problème nous oblige à combiner l'algorithme de compression progressive avec une méthode de tatouage réversible, qui permet de supprimer la déformation provoquée par l'insertion du tatouage et de restaurer de manière exacte le maillage original à la fin de la transmission.

Parmi les diverses méthodes existantes de tatouage réversible, nous adoptons une technique de décalage de classes d'histogramme, en raison principalement de sa robustesse.

4.3.1 Sélection de la primitive de tatouage

L'objectif des techniques de décalage de classes d'histogramme est d'insérer les bits de tatouage en construisant deux histogrammes d'une certaine caractéristique ayant des distributions similaires et en déplaçant légèrement ces histogrammes. La similarité initiale de ces histogrammes est cruciale, puisque l'insertion de tatouage n'est possible que lorsque les deux histogrammes présentent une distribution relativement proche. Par exemple, dans [DDM03], De Vleeschouwer et al. divisent les pixels de l'image 2D en deux ensembles de façon aléatoire et utilisent l'histogramme de luminance.

Pour construire de tels histogrammes, deux difficultés doivent être surmontées dans notre cas :

- une caractéristique du maillage 3D doit être choisie afin de construire deux histogrammes similaires, même pour les niveaux de détail grossiers et aussi garantir une bonne robustesse.

- un maillage 3D possède une structure topologique qui est intrinsèquement irrégulière, donc une séparation des éléments du maillage en deux ensembles de manière aléatoire est plus difficile que dans le cas des images 2D.

Pour résoudre le premier problème, nous supposons d'abord que la caractéristique sélectionnée doit être intrinsèquement liée à la forme du maillage 3D. Ainsi, nous avons choisi d'utiliser la distribution des normes des sommets du maillage, comme dans la méthode de Cho et al. [CP]07].

Le deuxième problème consiste à séparer les sommets du maillage de façon déterministe de sorte que les deux ensembles E_1 et E_2 peuvent être retrouvés à l'extraction sans aucune information associée. En outre, pour obtenir une bonne similarité entre les deux histogrammes, il est nécessaire de s'assurer que les sommets des deux ensembles sont bien répartis sur la surface du maillage. Comme notre méthode de tatouage est réalisée conjointement à la compression progressive, un moyen simple et fiable est de considérer l'ensemble des sommets qui vont être enlevés et l'ensemble des sommets qui vont rester à chaque itération de l'encodage. La figure 4.2 illustre une itération de simplification. Les sommets bleus forment E_1 et les autres sommets forment E_2 .

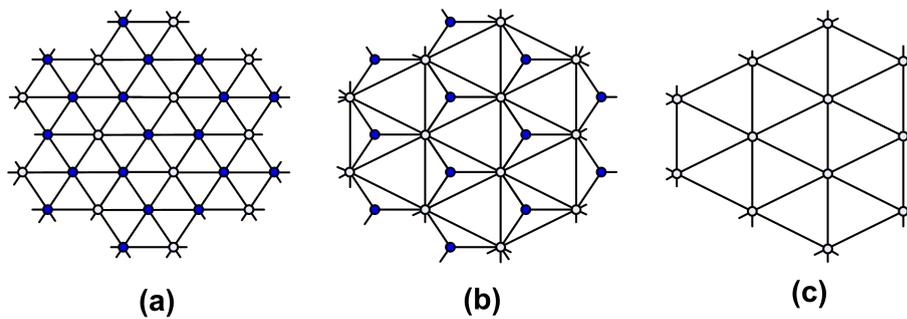


FIGURE 4.2 – Une étape de simplification du maillage. Un maillage (a) est simplifié par la première conquête (b) et la deuxième conquête. Les sommets enlevés (bleu) forment l'ensemble E_1 et les autres sommets forment l'ensemble E_2 .

4.3.2 Insertion du tatouage

Une fois les sommets séparés en deux ensembles, la première tâche de notre méthode d'insertion du tatouage est de convertir les coordonnées cartésiennes de chaque sommet $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ du niveau de détail courant en coordonnées sphériques (r_i, θ_i, ϕ_i) , en

utilisant :

$$\begin{aligned}
 r_i &= \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 + (z_i - z_c)^2} \\
 \theta_i &= \cos^{-1}\left(\frac{z_i - z_c}{r_i}\right) \\
 \phi_i &= \tan^{-1}\left(\frac{y_i - y_c}{x_i - x_c}\right) \quad 0 \leq i \leq |V| - 1
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Dans cette équation, $|V|$ désigne le nombre total des sommets, $v_c = (x_c, y_c, z_c)$ est le centre du maillage, et r_i correspond à la norme du sommet v_i .

Ensuite, les sommets sont divisés en deux ensembles E_1 et E_2 , comme expliqué ci-dessus, et la distribution des normes des sommets du premier ensemble E_1 est divisée en K classes distinctes $C1_k$:

$$C1_k = \{r_i | r_{min} + \Delta k \leq r_i < r_{min} + \Delta(k + 1)\} \tag{4.2}$$

où $0 \leq i \leq |E_1| - 1$ et $0 \leq k \leq K - 1$.

$|E_1|$ est le nombre de sommets dans l'ensemble E_1 , r_{min} et r_{max} sont respectivement le minimum et le maximum des normes de tous les sommets (i.e. sommets inclus dans E_1 ou E_2) du maillage original. Δ est l'unité de distance utilisée pour diviser les distributions des normes des sommets et correspond également à la distance de déplacement des sommets lors de l'insertion :

$$\Delta = \frac{r_{max} - r_{min}}{K} \tag{4.3}$$

De la même manière, les classes $C2_k$ du deuxième ensemble de sommets E_2 sont obtenus. Notons que Δ et v_c du niveau de détail le plus fin sont utilisés pour l'insertion pour chaque maillage intermédiaire ; le décodeur a besoin de ces valeurs pour extraire correctement le tatouage. L'histogramme H_1 (resp. H_2) est alors construit en comptant le nombre de sommets dans chaque classe $C1_k$ (resp. $C2_k$). Dans la figure 4.3, (a) et (b) illustrent respectivement H_1 et H_2 du niveau le plus fin (niveau n , 67 039 sommets) et (c) et (d) illustrent respectivement ceux du niveau après 7 itérations (niveau $n - 7$, 2 970 sommets) du modèle "Rabbit". Pour ces exemples, nous avons fixé le nombre de classes $K = 64$.

Nous pouvons observer dans cet exemple que les distributions des normes sont très proches même pour un niveau de détail grossier. Cette observation montre la pertinence de la primitive choisie et de la méthode utilisée pour générer les deux ensembles distincts de sommets.

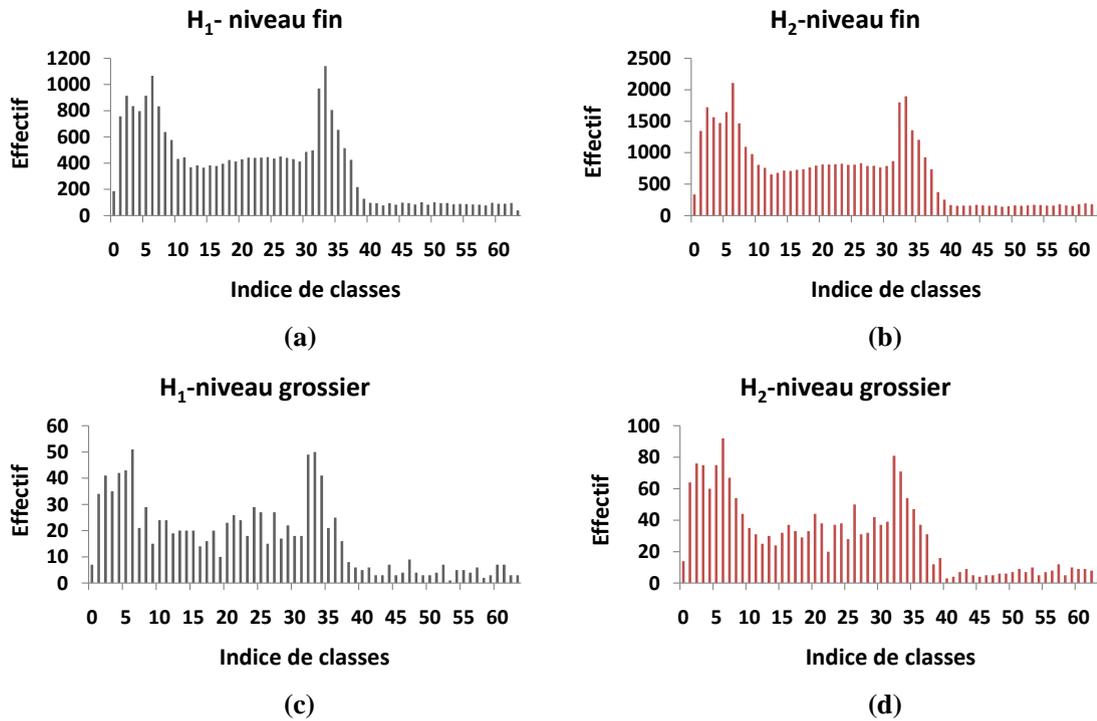


FIGURE 4.3 – Histogrammes des normes des sommets de deux ensembles E_1 et E_2 , pour le niveau le plus fin (a : H_1 du niveau n , b : H_2 du niveau n) et pour le niveau après 7 itérations (c : H_1 du niveau $n - 7$, d : H_2 du niveau $n - 7$) du modèle "Rabbit".

Ensuite nous calculons les centres de masse CM_1 de H_1 et CM_2 de H_2 :

$$\begin{aligned}
 CM_1 &= \sum_{k=0}^{K-1} \frac{k|C1_k|}{|E_1|} \\
 CM_2 &= \sum_{k=0}^{K-1} \frac{k|C2_k|}{|E_2|}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Dans cette équation, $|C1_k|$ et $|C2_k|$ sont respectivement le nombre d'éléments dans les classes $C1_k$ et $C2_k$.

Les valeurs de ces deux centres de masse sont en général très proches l'une de l'autre. Par exemple, $CM_1 = 21,19$ et $CM_2 = 21,07$ pour le niveau de détail le plus fin du modèle "Rabbit" (figure 4.3.a et figure 4.3.b), et $CM_1 = 21,6$ et $CM_2 = 20,8$ pour le niveau $n - 7$ (figure 4.3.c et figure 4.3.d).

Pour insérer un bit de tatouage, nous modifions l'ordre relatif des CM_1 et CM_2 . Plus concrètement, nous modifions CM_1 en déplaçant les classes de l'histogramme H_1 pour que le signe de la différence entre la valeur modifiée CM_1^w et CM_2 prenne une valeur

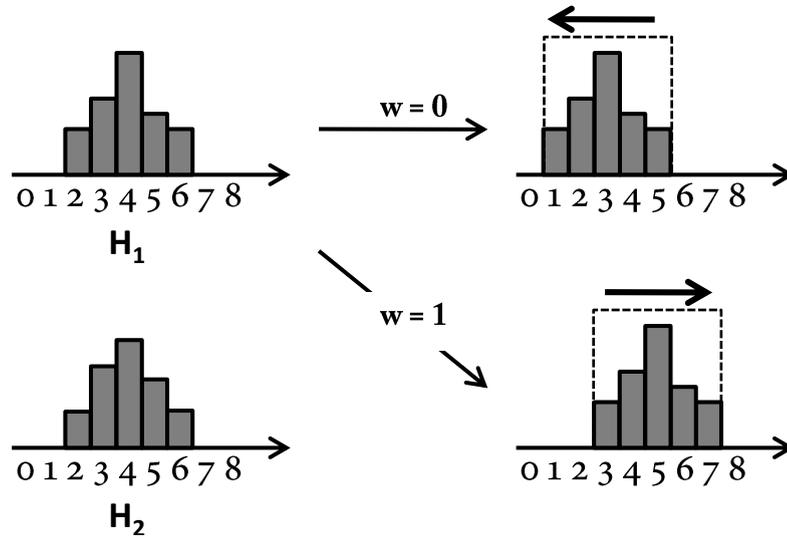


FIGURE 4.4 – La valeur du centre de masse CM_1 est modifiée pour insérer un bit. La modification est effectuée en déplaçant les classes de l’histogramme H_1 . Dans cet exemple, nous fixons $F = 1$.

spécifique, selon le bit de tatouage à insérer w :

$$CM_1^w - CM_2 = \begin{cases} < 0, & \text{si } w = 0 \\ \geq 0, & \text{si } w = 1 \end{cases} \quad (4.5)$$

La figure 4.4 illustre l’opération de décalage de l’histogramme. Cette opération consiste à soustraire (resp. ajouter) Δ aux normes des sommets de l’ensemble E_1 si le bit à insérer est 0 (resp. 1).

$$\forall v_i \in E_1, r_i = \begin{cases} r_i - \Delta F, & \text{si } w = 0 \\ r_i + \Delta F, & \text{si } w = 1 \end{cases} \quad (4.6)$$

Dans cette équation, F désigne la force de tatouage (fixée à 1 dans la figure 4.4). F correspond au nombre de classes déplacées lors de l’insertion et elle est également liée au degré de variation de CM_1 . Ce changement de l’histogramme modifie le centre de masse comme suit :

$$CM_1^w = \begin{cases} CM_1 - F, & \text{si } w = 0 \\ CM_1 + F, & \text{si } w = 1 \end{cases} \quad (4.7)$$

Lors du décodage, le bit est extrait en évaluant le signe de $CM_1^w - CM_2$.

Dans la méthode proposée, l’insertion du tatouage n’est possible que lorsque la différence absolue entre les deux centres de masses initiaux est inférieure à la valeur de force du tatouage ($|CM_1 - CM_2| < F$). Sinon, il s’agit d’un cas particulier où l’insertion n’est pas possible. Ce cas particulier est traité plus en détail dans la section 4.3.4.

Notons que nous modifions seulement l'histogramme de l'ensemble E_1 qui est constitué des sommets qui seront supprimés à la prochaine opération de décimation. La principale raison est que la préservation de la forme originale dans tous les niveaux de détails est importante pour la compression progressive. Si nous modifions les sommets de l'ensemble E_2 (les sommets qui vont rester après chaque étape de décimation), la forme globale du maillage se déforme de plus en plus à chaque itération de l'encodage. Ainsi afin d'améliorer la qualité d'approximation, ainsi que le compromis débit-distorsion, nous ne modifions pas les sommets de l'ensemble E_2 .

4.3.3 Extraction du tatouage

Pour extraire le tatouage, nous avons besoin de la position de $v_c = (x_c, y_c, z_c)$ et de la valeur de Δ utilisées à l'insertion du tatouage. Par conséquent, nous avons besoin de stocker ces 4 nombres flottants pour l'extraction du tatouage, et ils constituent la clé du tatouage.

Le processus d'extraction est similaire à celui de l'insertion. La figure 4.5 illustre une itération de décompression (i.e. raffinement du maillage) et d'extraction conjointe du tatouage. Tout d'abord, le maillage intermédiaire courant (figure 4.5.a) est raffiné par l'insertion d'un ensemble de sommets (les sommets colorés en rouge dans la figure 4.5.b). Ce maillage est déformé puisque les positions des sommets insérés ont été modifiés lors de l'insertion du tatouage au cours de l'encodage. Ensuite, les deux histogrammes sont construits à partir des deux ensembles de sommets (constitués respectivement des sommets noirs et des sommets rouges dans cette figure). La comparaison des deux centres de masse CM_1^w et CM_2 de ces histogrammes permet d'extraire un bit de tatouage w' en calculant le signe de leur différence :

$$w' = \begin{cases} 0 & \text{si } CM_1^w - CM_2 < 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.8)$$

Ensuite, nous corrigeons la géométrie du maillage en effectuant l'opération inverse du processus d'insertion (figure 4.5.c).

$$\forall v_i \in E_1, r_i = \begin{cases} r_i + \Delta F, & \text{si } w' = 0 \\ r_i - \Delta F, & \text{si } w' = 1 \end{cases} \quad (4.9)$$

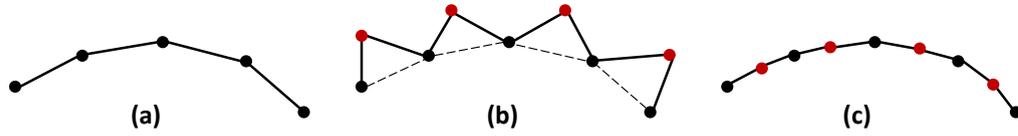


FIGURE 4.5 – Une étape de raffinement du maillage et l'extraction du tatouage. Un maillage intermédiaire (a) est raffiné (b). Après l'extraction, la distorsion induite par l'insertion est supprimée (c).

4.3.4 Traitement du cas particulier

Dans la méthode proposée, un cas particulier apparaît à l'insertion lorsque $|CM_1 - CM_2| \geq F$. Dans ce cas, les deux ensembles de sommets ne peuvent pas porter un bit d'information, puisque nous ne pouvons pas ajuster le signe de la différence des deux centres de masse en fonction du bit du tatouage en décalant l'histogramme (équations 4.5 et 4.7). Néanmoins, même dans cette situation, nous devons modifier CM_1 par un décalage de l'histogramme H_1 dans le sens qui fait augmenter la différence des deux centres de masse afin de ne pas interférer avec l'extraction du tatouage des cas normaux.

Le décodeur peut ainsi détecter ce cas particulier en comparant CM_1^w and CM_2 :

$$\begin{cases} \text{cas normal, si } |CM_1^w - CM_2| < 2F \\ \text{cas particulier, si } |CM_1^w - CM_2| \geq 2F \end{cases} \quad (4.10)$$

Dans le cas des images 2D [DDM03], le bruit *poivre et sel* peut se produire lors du décalage de l'histogramme. Plus précisément, les deux classes extérieures de l'histogramme peuvent être décalées vers l'autre côté de l'histogramme, à cause du nombre limité des classes dans l'histogramme de luminance (le nombre de niveaux de gris est 256), provoquant une distorsion importante. Dans notre cas, ce problème peut être facilement résolu en générant des classes vides sur les deux côtés extrêmes de l'histogramme. D'une manière générale, le centre de gravité du maillage et le sommet le plus proche sont suffisamment distants pour créer des classes vides. Si ce n'est pas le cas, nous déplaçons le centre de gravité à l'endroit permettant de créer des classes vides. Un exemple de ce déplacement du centre de gravité est illustré dans la figure 4.6.

4.3.5 Réversibilité complète et nouvelle méthode de prédiction pour la géométrie

Dans la méthode proposée, une quantification initiale est effectuée à l'encodage. Tous les sommets ont donc une position quantifiée et cette position doit être restaurée pendant

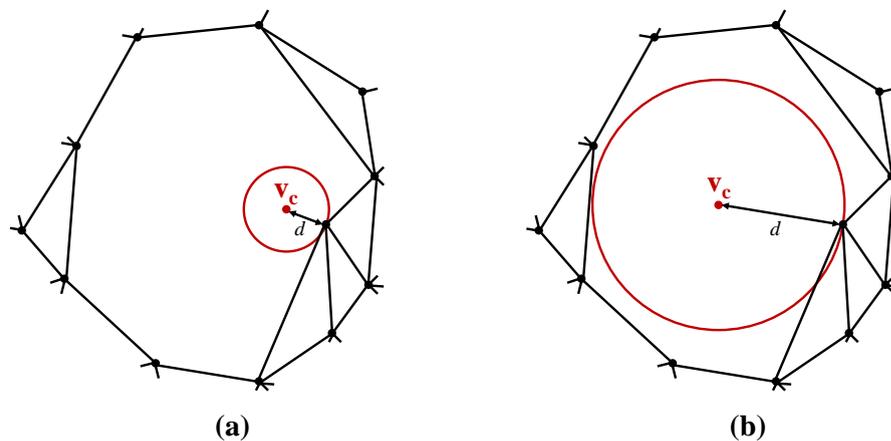


FIGURE 4.6 – Lorsque la distance d entre le centre de gravité du maillage v_c et le sommet le plus proche n'est pas suffisante ($d < F$) pour générer les classes vides (à gauche), nous déplaçons le centre de gravité à une autre position permettant de créer les classes (à droite).

le décodage et l'extraction du tatouage.

Malheureusement, la réversibilité (restauration de la position initiale et exacte) n'est pas garantie pour tous les sommets. Un exemple est montré dans la figure 4.7. Au cours de l'insertion du tatouage, un sommet initial v_i est déplacé en ajoutant Δ à sa distance par rapport au centre de gravité lors de l'insertion du tatouage. Ensuite, il est déplacé vers la position quantifiée la plus proche v_w (position tatouée). A l'extraction, le sommet v_w est déplacé cette fois-ci en soustrayant Δ , puis il est déplacé à nouveau à une position quantifiée v_e (position extraite). Les positions de v_i et v_e sont différentes dans ce cas, puisque le déplacement n'est pas effectué dans la même direction à l'insertion et à l'extraction.

Dans notre méthode, l'insertion du tatouage est effectuée à chaque itération de l'encodage en modifiant la géométrie. La position modifiée de chaque sommet est encodée en utilisant une prédiction basée sur les sommets voisins. Pendant la décompression, les nouveaux sommets sont introduits et ces sommets sont déplacés afin de supprimer la déformation induite par l'insertion. La position exacte de ces sommets ne peut pas toujours être restituée comme nous montre le cas de la figure 4.7. Ces positions erronées sont ensuite utilisées pour prédire les sommets qui seront insérés lors du prochain raffinement, et l'erreur géométrique s'accumule ainsi au fur et à mesure. Pour éviter ce problème, nous précalculons les positions extraites de chaque sommet pendant l'encodage pour les utiliser pour la prédiction. De cette manière, le codeur et le décodeur ont la même configuration géométrique de voisinage pour tous les sommets et l'erreur géométrique ne s'accumule pas pendant la décompression. La figure 4.8 illustre les maillages

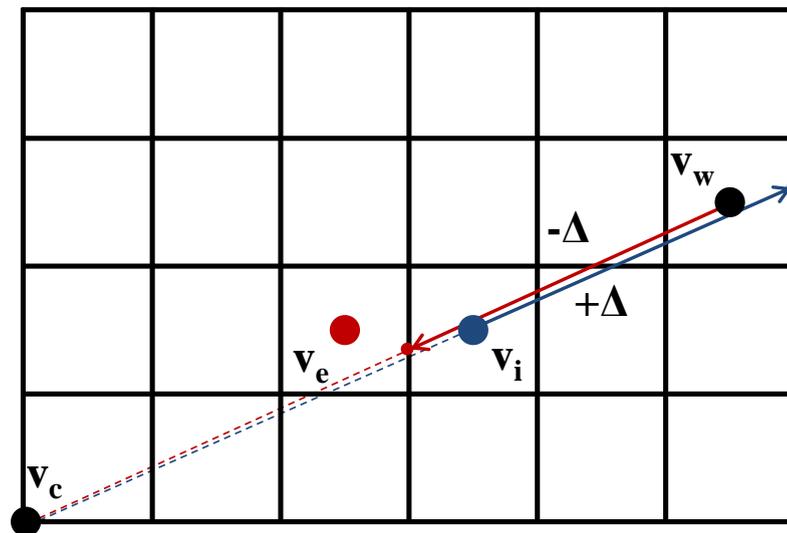


FIGURE 4.7 – Un exemple de violation de la réversibilité. Le sommet initial v_i est déplacé à la position tatouée et quantifiée v_w au cours de l’insertion. A l’extraction, v_w est déplacé dans une direction opposée, légèrement différente dû à la deuxième quantification. La position extraite v_e est différente que la position initiale v_i .

reconstruits au niveau de résolution le plus haut. Les sommets qui sont colorés en rouge (ligne du bas) sont des sommets dont la position exacte n’est pas restaurée. On peut remarquer que le nombre de sommets erronés est faible, et la déformation géométrique dû à la violation de réversibilité est difficilement perceptible (ligne du haut).

Notre méthode offre également la possibilité d’une réversibilité complète permettant une reconstruction exacte du modèle (il existe uniquement l’erreur de quantification), en codant dans le flux compressé la différence entre v_e et v_i pour chaque sommet. Dans l’exemple de la figure 4.7, nous encodons un vecteur $(0,1)$ qui permet de déplacer v_e à la position initiale v_i . Une telle violation de la réversibilité apparaît rarement, donc seul un faible surcoût de codage est nécessaire pour cette option (voir la section des résultats expérimentaux).

Dans un système conjoint de compression et de tatouage, l’insertion du tatouage fait augmenter généralement le taux de compression. Effectivement, la géométrie du maillage est déformée lors de l’insertion du tatouage. La surface résultante est donc beaucoup moins lisse, et le codage de cette surface nécessite en général un surcoût ; la géométrie du maillage courant (figure 4.5.c) est modifiée pour insérer un bit de tatouage (figure 4.5.b) et les positions de ces sommets déplacés sont codés pour permettre au décodeur d’extraire le tatouage.

Afin de réduire l’augmentation du taux de compression, nous proposons une nouvelle méthode de prédiction, comme illustrée dans la figure 4.9.

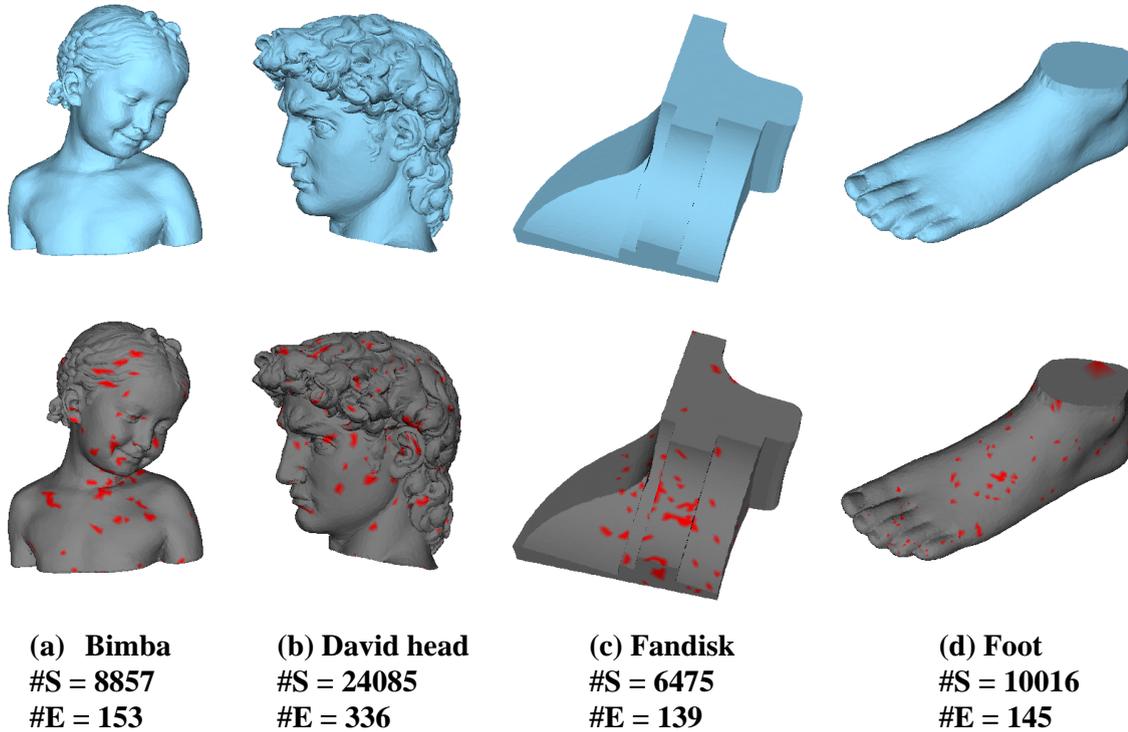


FIGURE 4.8 – Les maillages obtenus à la fin de la reconstruction : Bimba, David head, Fandisk et Foot. Les sommets qui ont violé la réversibilité sont colorés en rouge (ligne du bas). #S et #E désignent respectivement le nombre de sommets du maillage original et le nombre de sommets erronés (qui n'ont pas retrouvé la position initiale). Ici, nous fixons $F = 2$ et $K = 256$.

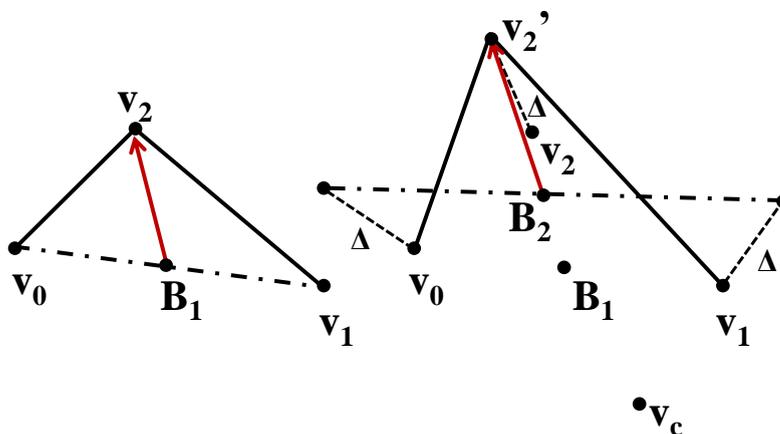


FIGURE 4.9 – La méthode originale de prédiction (à gauche) ne permet pas un codage efficace pour notre système conjoint (à droite). La méthode de prédiction proposée prend en compte le déplacement du sommet à coder (v_2') pour réduire de façon efficace le surcoût dû au changement de la géométrie.

La figure 4.9.a montre la méthode de prédiction utilisée pour le codage géométrique dans la méthode originale [ADo1a]. La position du sommet à enlever v_2 est prédite à partir de la position moyenne B_1 de ses sommets voisins v_0 et v_1 . Dans notre cas (la figure 4.9.b), v_2 est déplacé en v'_2 pendant l'insertion du tatouage, ainsi B_1 n'est plus une position adéquate pour la prédiction. Pour prédire plus efficacement cette position v'_2 , nous utilisons B_2 qui est la position moyenne de v_0 et v_1 après les avoir déplacé avec la même amplitude et dans le même sens par rapport au centre de gravité v_c . En prenant en compte le déplacement des sommets lors de l'insertion, nous pouvons coder la géométrie plus efficacement. Un problème important est de déterminer le sens du déplacement pendant la décompression. Nous résolvons ce problème en codant les trois premiers sommets sans aucune prédiction à chaque itération. Ensuite le décodeur déduit le sens du déplacement en comparant chacun des sommets avec ses sommets voisins.

4.3.6 Augmentation de la capacité de tatouage

La méthode proposée peut insérer un seul bit dans chaque niveau de détails. La capacité du tatouage (nombre de bits insérés) n'est donc pas suffisante pour les applications générales. Afin d'augmenter la capacité du tatouage, nous décomposons chaque maillage intermédiaire en plusieurs régions pour insérer un bit dans chaque région. Pour que le codeur et le décodeur aient la même configuration des régions pour chaque maillage intermédiaire, la décomposition doit être effectuée de manière déterministe.

Une méthode simple et rapide est de décomposer d'abord le maillage de base (le niveau le plus grossier) en R régions, puis de mettre à jour ces régions pendant le raffinement successifs à la décompression. Un exemple de la décomposition du maillage de base avec $R = 2$ est présenté dans la figure 4.10. Tout d'abord nous devons choisir deux arêtes initiales pour générer les régions. Nous voulons que les arêtes initiales soient distribuées de manière uniforme sur la surface afin de générer les régions homogènes sur le maillage de base. Pour cela, nous parcourons en largeur le maillage de base en numérotant ses sommets (figure 4.10.a), en partant de l'arête germe utilisée pour la compression (l'arête colorée en rouge). Comme le nombre de sommets de ce maillage est de 19, le sommet $\lfloor \frac{19}{R} \rfloor = 9$ est utilisé pour choisir la deuxième arête initiale. Nous choisissons l'arête qui relie le sommet 9 et le sommet dont l'indice est plus petit parmi ses voisins (l'arête colorée en bleu dans figure 4.10.b). Cette arête et l'arête germe forment deux frontières initiales de chaque région, et à chaque itération chaque région s'agrandit en absorbant les sommets opposés à sa frontière (figures 4.10.c et 4.10.d). Les régions finales sont obtenues lorsque tous les sommets sont traités (figure 4.10.e).

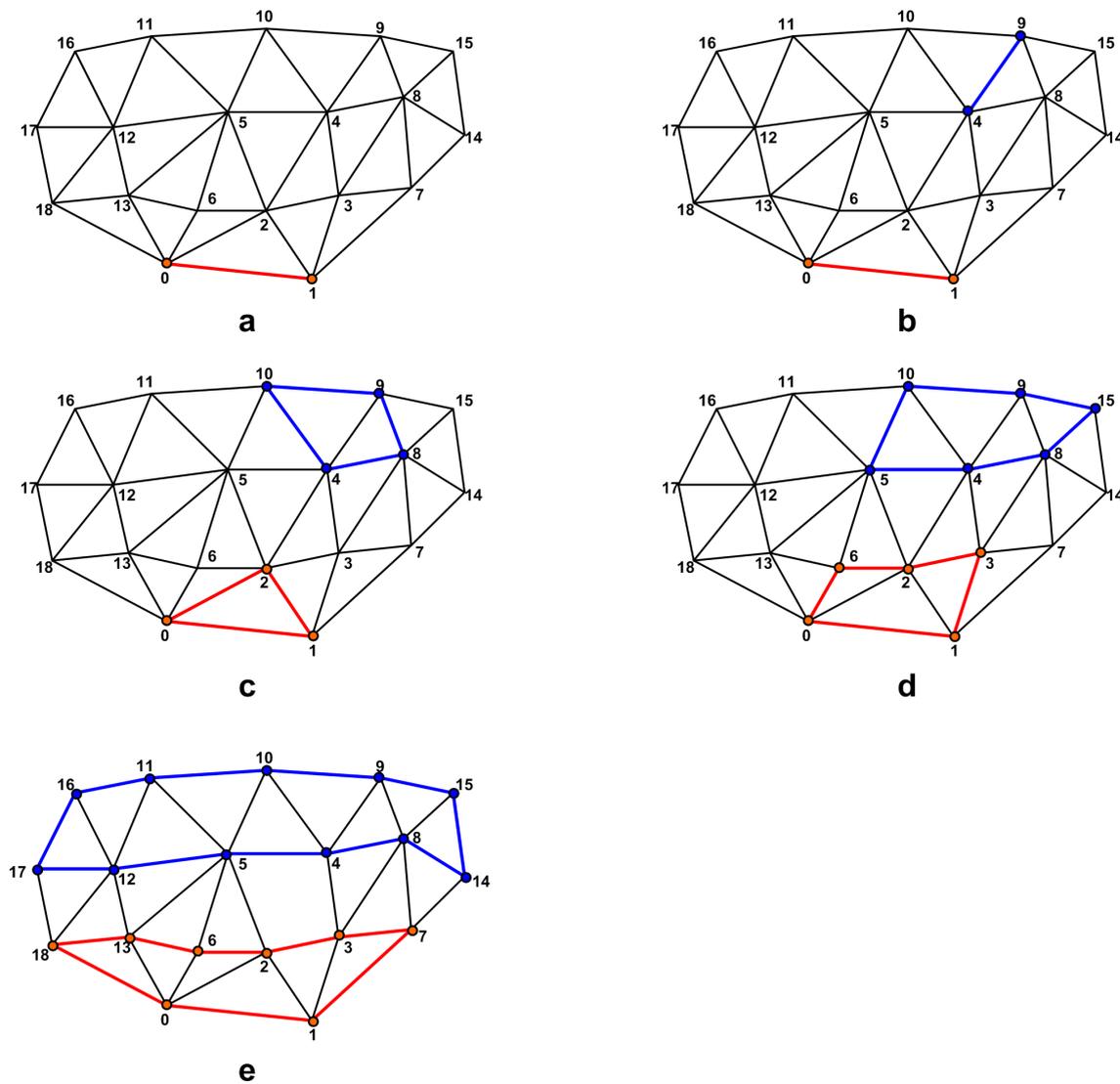


FIGURE 4.10 – La décomposition du maillage de base. Ici, nous fixons $R = 2$.

Ensuite, à chaque étape de raffinement, lorsqu'un sommet est inséré, nous assignons à ce sommet l'indice de la région la plus fréquente parmi ses sommets voisins. Cette décomposition de maillage permet d'augmenter le nombre de bits insérés. La figure 4.11 illustre différents niveaux de détails du modèle "Horse" obtenu pendant la décompression. Dans cet exemple, 20 régions sont générées sur le maillage de base, ensuite ces régions s'enrichissent à chaque itération en absorbant les nouveaux sommets.

Nous observons que le nombre de sommets dans une région doit être suffisamment élevé pour que cette région soit capable de porter un bit d'information. Inversement ce nombre est souvent plus grand que nécessaire dans les niveaux de résolutions fins, surtout dans le cas de gros maillages. Pour augmenter encore la capacité du tatouage, nous divisons une région en deux sous-régions si son nombre de sommets est supérieur

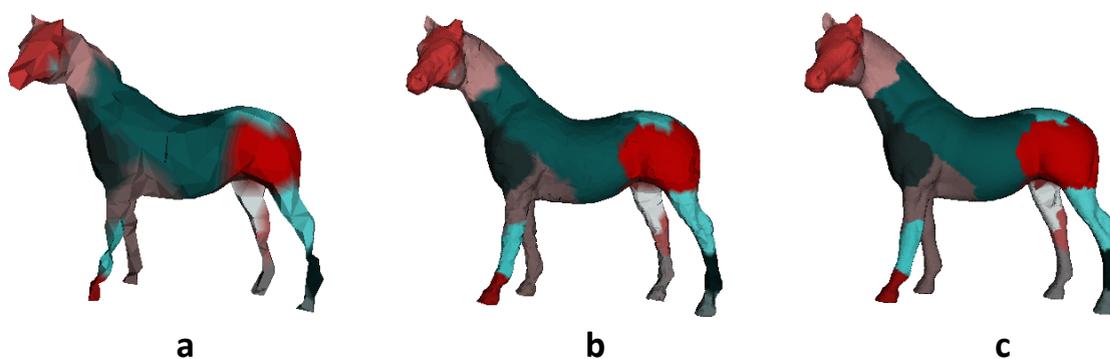


FIGURE 4.11 – La décomposition du modèle "Horse" dans les différents niveaux de détails $n - 8$ (a), $n - 4$ (b) et n (c). Les régions sont illustrées avec des couleurs distinctes.

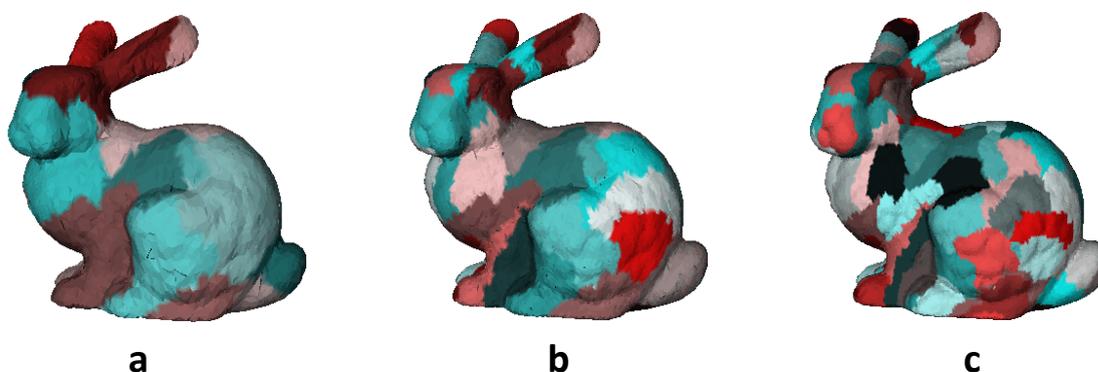


FIGURE 4.12 – La décomposition du modèle "Bunny" dans les différents niveaux de détails $n - 4$ (a), $n - 2$ (b) et n (c). Dans cette figure, la région est divisée lorsque le nombre de ses sommets est supérieur à $N_{division} = 500$.

à un paramètre défini par l'utilisateur, $N_{division}$. Pour cette division, de manière similaire à la décomposition du maillage de base, nous numérotons d'abord les sommets du maillage. Lorsqu'une région doit être divisée en deux sous-régions, nous choisissons d'abord le sommet dont le numéro est le plus petit parmi les sommets de cette région. Ensuite, en partant de ce sommet, nous parcourons les sommets de cette région de manière concentrique, et la moitié des sommets premièrement rencontrés de cette région forme une nouvelle région. Cette manière de la division est déterministe et le décodeur peut réaliser la même opération sans aucune information supplémentaire.

La figure 4.12 nous montre un exemple de ce processus de division appliqué sur le modèle "Bunny". Pendant la décompression progressive, une région dont le nombre de sommets est supérieur à $N_{division} = 500$ est divisée en deux sous-régions de tailles égales.

Au contraire, lorsqu'un bit est inséré dans une région où il y a peu de sommets, ce bit de tatouage est plus fragile qu'un bit inséré dans une région possédant un nombre important de sommets. De plus, lorsque la position initiale d'un sommet n'est pas res-

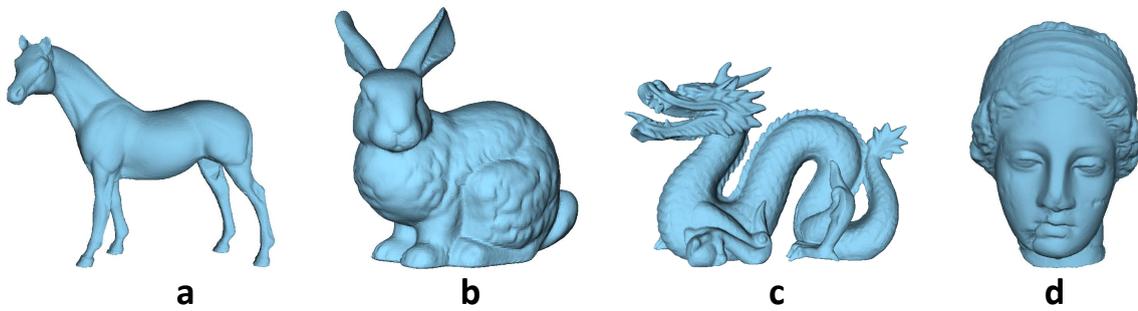


FIGURE 4.13 – Les maillages originaux : (a) Horse, (b) Bunny, (c) Dragon and (d) Venus.

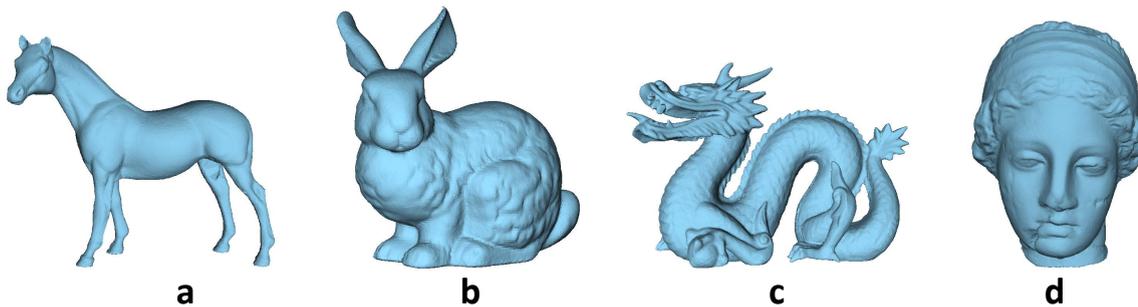


FIGURE 4.14 – Les maillages reconstruits : (a) Horse, (b) Bunny, (c) Dragon and (d) Venus. Ici, nous fixons $F = 6$.

taurée exactement en raison du problème de violation de réversibilité (voir la section 4.3.5), ce sommet peut être affecté à une autre classe de l’histogramme et peut perturber l’extraction du tatouage pour une région ayant peu d’éléments. Pour ces raisons, nous utilisons une région pour le tatouage si et seulement si le nombre d’éléments est supérieur à N_{min} . Sinon, les sommets de cette région ne sont pas déplacés pendant l’insertion. Au décodage, nous pouvons vérifier si une région est utilisée pour le tatouage en observant simplement le nombre de ses sommets.

4.4 Résultats expérimentaux

Plusieurs modèles sont utilisés pour l’évaluation et quatre d’entre eux sont illustrés dans la figure 4.13 : Horse (19 851 sommets), Bunny (34 835 sommets), Dragon (50 000 sommets) et Venus (100 759 sommets). Les bits de tatouage sont générés aléatoirement. Si aucune modification explicite n’est mentionnée, les paramètres suivants sont utilisés dans nos expériences ; le nombre de classes de l’histogramme $K = 256$, le nombre de régions $R = 20$, le nombre minimum de sommets $N_{min} = 50$, et les options de division des grandes régions et de réversibilité complète sont désactivées.

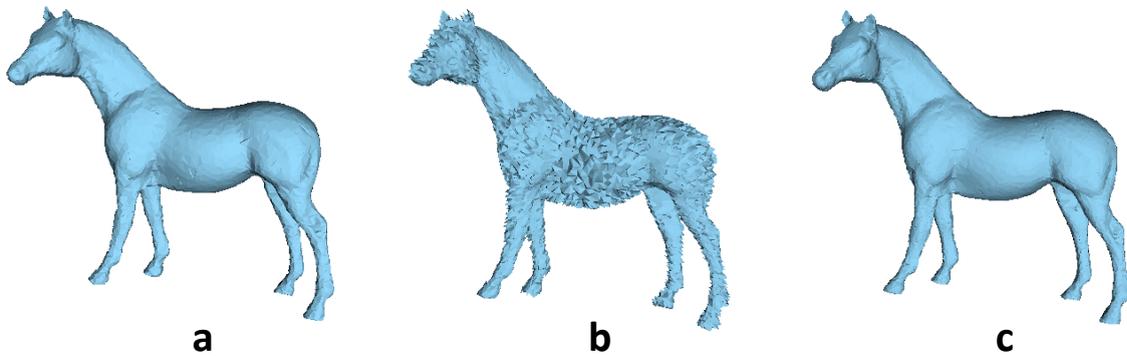


FIGURE 4.15 – Une étape d’insertion de sommets et de correction de la géométrie. Nous insérons un ensemble de sommets au maillage intermédiaire (niveau $n - 4$) du modèle "Horse" (a) pour obtenir un niveau de détail plus élevé (b). Lors de l’extraction du tatouage, la déformation induite par l’insertion du tatouage est supprimée (c). Dans cette figure, nous fixons $F = 6$.

4.4.1 Evaluation du taux de compression, de la distorsion et de la capacité

La figure 4.14 illustre les maillages obtenus après la transmission et la reconstruction totale. L’option de la réversibilité complète n’est pas activée et la force de tatouage est fixée à $F = 6$. Nous observons que la distorsion est imperceptible, même si certains sommets ont violé la réversibilité lors de l’extraction du tatouage (voir la section 4.3.5).

Nous illustrons également une étape d’insertion de sommets et d’extraction du tatouage dans la figure 4.15. Nous insérons un ensemble de sommets au maillage intermédiaire du niveau $n - 4$ du modèle "Horse" (a) pour obtenir un niveau de détail plus élevé (b) pendant le décodage. Ensuite, le tatouage est extrait et en même temps la géométrie du maillage est corrigée (c). Au cours de la transmission progressive, ces deux opérations sont effectuées simultanément pour que les maillages intermédiaires déformés par l’insertion du tatouage ne soient pas visualisés à l’utilisateur.

Le tableau 4.1 donne la performance en termes de taux de compression de notre méthode de compression sans l’adaptation de quantification et de notre méthode conjointe pour $F = 2$ et $F = 6$. Tous les maillages sont quantifiés en utilisant 12 bits par coordonnée. La distorsion entre les modèles originaux et les modèles reconstruits au niveau de détail le plus fin est mesurée avec l’outil Metro [CRS98] en termes de maximum des erreurs RMS (MRMS) normalisées par rapport à la boîte englobante. Nous détaillons également le temps de calcul de l’encodage (en secondes) et la capacité (en bits).

Notre méthode quasi-réversible encode les maillages testés avec des débits similaires à la méthode originale. Le surcoût de codage induit par l’introduction du tatouage est seulement de 0,56 bits par sommet (bps) pour $F = 2$ et 1,10 bps pour $F = 6$ en moyenne, ce qui prouve l’efficacité de notre méthode de prédiction. Ce surcoût est causé principa-

	Unité	F	Horse	Bunny	Dragon	Venus
Sans tatouage	bps		20.89	18.55	19.94	17.30
Quasi-réversible	bps	2	21,18	19,47	20,34	17,95
	bps	6	21,65	20,27	20,48	18,68
MRMS (10^{-5})		2	3,71	3,65	4,00	3,36
		6	4,47	4,25	4,72	3,73
Réversibilité complète	bps	2	21,33	19,61	20,52	18,05
	bps	6	22,23	20,72	20,97	18,97
MRMS (10^{-5})			3,70	3,46	3,79	3,24
Temps de traitement	s		1,37	2,43	3,82	7,57
Capacité	bits	2	93	116	110	171
	bits	6	106	131	137	183

TABLEAU 4.1 – Taux de compression de notre méthode de compression sans l’adaptation de quantification, notre méthode avec la quasi-réversibilité et avec la réversibilité complète. La distorsion, le temps de traitement et la capacité sont également listés.

lement par la déformation géométrique provoquée par l’insertion du tatouage, et il n’est pas directement lié au nombre de bits insérés. En outre, la réversibilité complète peut être réalisée avec un coût supplémentaire de codage de 0,15 bps pour $F = 2$ et 0,45 bps pour $F = 6$ en moyenne. Les valeurs de distorsion de notre méthode avec la réversibilité complète correspondent à l’erreur de la quantification initiale et nous pouvons observer que notre méthode quasi-réversible génère des maillages ayant presque les mêmes valeurs de distorsion.

La figure 4.16 illustre la capacité de la méthode proposée en fonction du nombre initial de régions, R . L’option de division des grandes régions est désactivée pour la figure 4.16.a et il est activé avec $N_{division} = 500$ pour la figure 4.16.b. On peut remarquer que la capacité est élevée pour tous les modèles testés et elle est relativement proportionnelle à la taille des maillages. Le nombre de niveaux est compris entre 10 et 14 pour les modèles testés. Nous avons également appliqué notre méthode sur un maillage moins dense (Fandisk, 6 475 sommets). Le nombre de niveaux est de 7 pour ce modèle, et nous pouvons insérer 52 bits avec $F = 6$. Avec d’autres modèles qui ont à peu près 5 000 sommets, notre méthode permet d’insérer environ 50 bits.

Dans la méthode proposée, le raffinement du maillage peut s’effectuer sans utiliser l’extraction du tatouage. Ainsi, selon le niveau d’autorisation de chaque utilisateur, nous pouvons fournir différentes qualités géométriques du maillage en activant ou non l’extraction du tatouage et la réversibilité. Par exemple, on peut désactiver l’extraction du tatouage et de la correction de la géométrie pour les utilisateurs ayant un droit limité pour qu’ils obtiennent des maillages fortement déformés, comme l’illustre la figure 4.17.

Contrairement à un algorithme de cryptage qui interdit à un utilisateur non autorisé

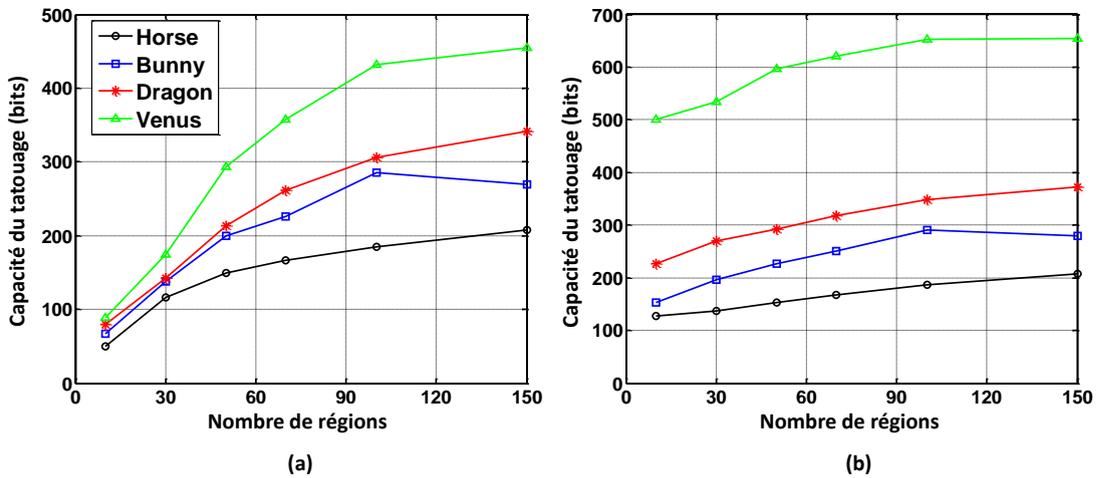


FIGURE 4.16 – Capacité du tatouage en fonction du nombre initial de régions. Le nombre initial de régions est préservé au cours de la transmission progressive dans (a) et des grandes régions sont divisées dans (b) avec un seuil $N_{division} = 500$.

d'obtenir le maillage reconstruit, notre méthode permet une visualisation progressive de la version déformée.

4.4.2 Évaluation de la robustesse

Pour l'évaluation de la robustesse, nous fixons $N_{min} = 200$ et $F = 6$. La robustesse du tatouage inséré est évaluée en termes de taux d'erreur (bit error rate (BER) en anglais) et en termes de corrélation entre la séquence de bits du tatouage inséré $\{w_n\}$ et celle du tatouage extrait $\{w'_n\}$:

$$Corr = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (w_n - \bar{w})(w'_n - \bar{w}')}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (w_n - \bar{w}) \sum_{n=0}^{N-1} (w'_n - \bar{w}')}} \quad (4.11)$$

où \bar{w} et \bar{w}' sont respectivement la moyenne des valeurs des bits de $\{w_n\}$ et ceux de $\{w'_n\}$. Les résultats sont obtenus en moyennant les résultats de cinq expériences avec différentes séquences de bits aléatoires.

4.4.2.1 Robustesse contre le bruit du canal

Au cours de la transmission à travers les réseaux, des erreurs peuvent être introduites par le canal. Ce bruit peut perturber le décodeur et peut modifier la position des sommets insérés. Nous évaluons la robustesse contre cette attaque en la considérant comme une attaque d'addition de bruit aléatoire appliquée sur chaque sommet inséré à chaque itération de raffinement.

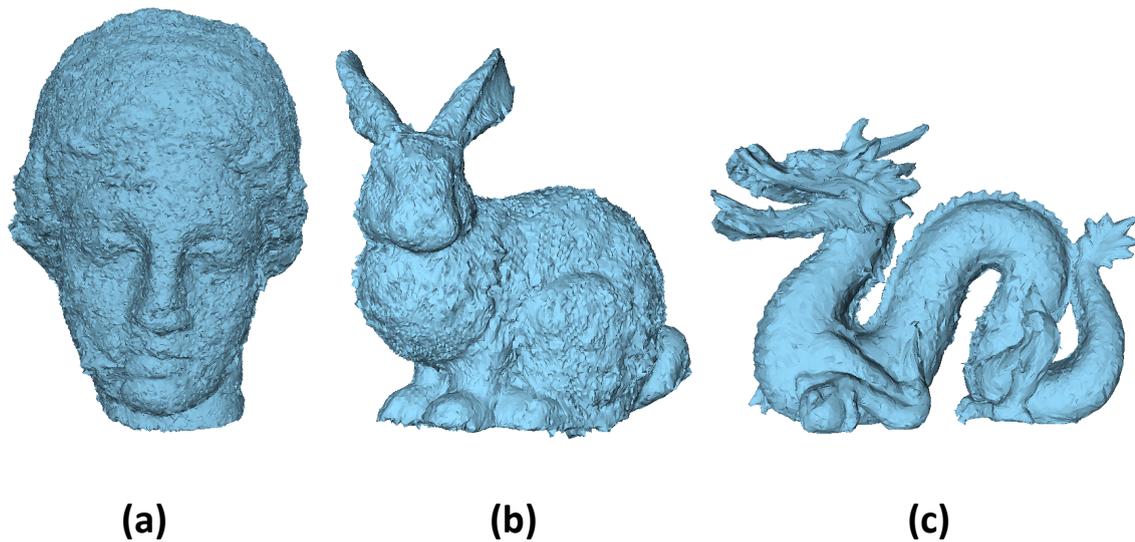


FIGURE 4.17 – Les maillages reconstruits sans l'extraction du tatouage et la correction de la géométrie : (a) Venus, (b) Bunny, (c) Dragon.

Modèle	MRMS (10^{-3})	BER	Corr	Capacité
Horse	1.03	0,01	0,98	51
Bunny	1.52	0,01	0,98	72
Dragon	2.42	0,34	0,32	83
Venus	1.77	0,07	0,85	128

TABLEAU 4.2 – Robustesse contre le bruit du canal, qui est simulé par une attaque d'addition de bruit aléatoire sur chaque sommet inséré.

Le tableau 4.2 présente les résultats de la robustesse contre le bruit du canal. L'amplitude du bruit additif est fixé à 0,5 % de la distance moyenne des sommets au centre de gravité. Les résultats montrent que notre algorithme est robuste contre ce type d'attaque, sauf pour le modèle "Dragon", puisque sa complexité de forme est relativement élevée par rapport au nombre de ses éléments.

4.4.2.2 Robustesse contre les attaques intentionnelles

Pendant la transmission, un maillage intermédiaire peut être intercepté et modifié par un pirate pour supprimer le tatouage. Ainsi il est nécessaire de protéger tous les maillages intermédiaires. Dans la méthode proposée, l'extraction des bits du tatouage est possible à chaque niveau de détails, tout simplement en insérant les sommets du niveau de résolution suivant. Le niveau de détail le plus fin peut également être protégé en créant et en codant un niveau supplémentaire pendant le processus d'encodage, en utilisant une méthode de subdivision de maillage par exemple. Ce niveau supplémentaire n'est pas transmis au client et il est utilisé seulement pour protéger le niveau le plus fin.

La robustesse contre le bruit du canal est évaluée en modifiant seulement les sommets insérés à chaque itération, alors que tous les sommets de chaque niveau de détail sont modifiés dans cette évaluation.

Modèle	MRMS (10^{-3})	BER			Corr		
		Nous	Cho	Wang	Nous	Cho	Wang
Horse	3,82	0,04			0,91		
Bunny	3,52	0,03	0,17	0,11	0,93	0,69	0,77
Dragon	4,17	0,04		0,19	0,86		0,61
Venus	4,00	0,07		0,11	0,91		0,78

TABLEAU 4.3 – Robustesse contre l'addition de bruit aléatoire avec une amplitude de 0,5 %.

Modèle	MRMS (10^{-2})	BER			Corr		
		Nous	Cho	Wang	Nous	Cho	Wang
Horse	2,22	0,02			0,96		
Bunny	2,35	0,03	0,16	0,19	0,93	0,69	0,62
Dragon*	2,66	0,33		0,24	0,31		0,52
Venus	2,59	0,01		0,04	0,99		0,92

TABLEAU 4.4 – Robustesse contre le lissage Laplacien avec 30 itérations et un facteur de déformation $\lambda = 0,03$. Pour le modèle "Dragon" 50 itérations sont utilisées.

Nous donnons dans cette section les résultats de robustesse contre des attaques géométriques classiques. Comme notre algorithme est basé sur une technique de compression progressive dirigée par la connectivité, le raffinement n'est pas possible lors d'un

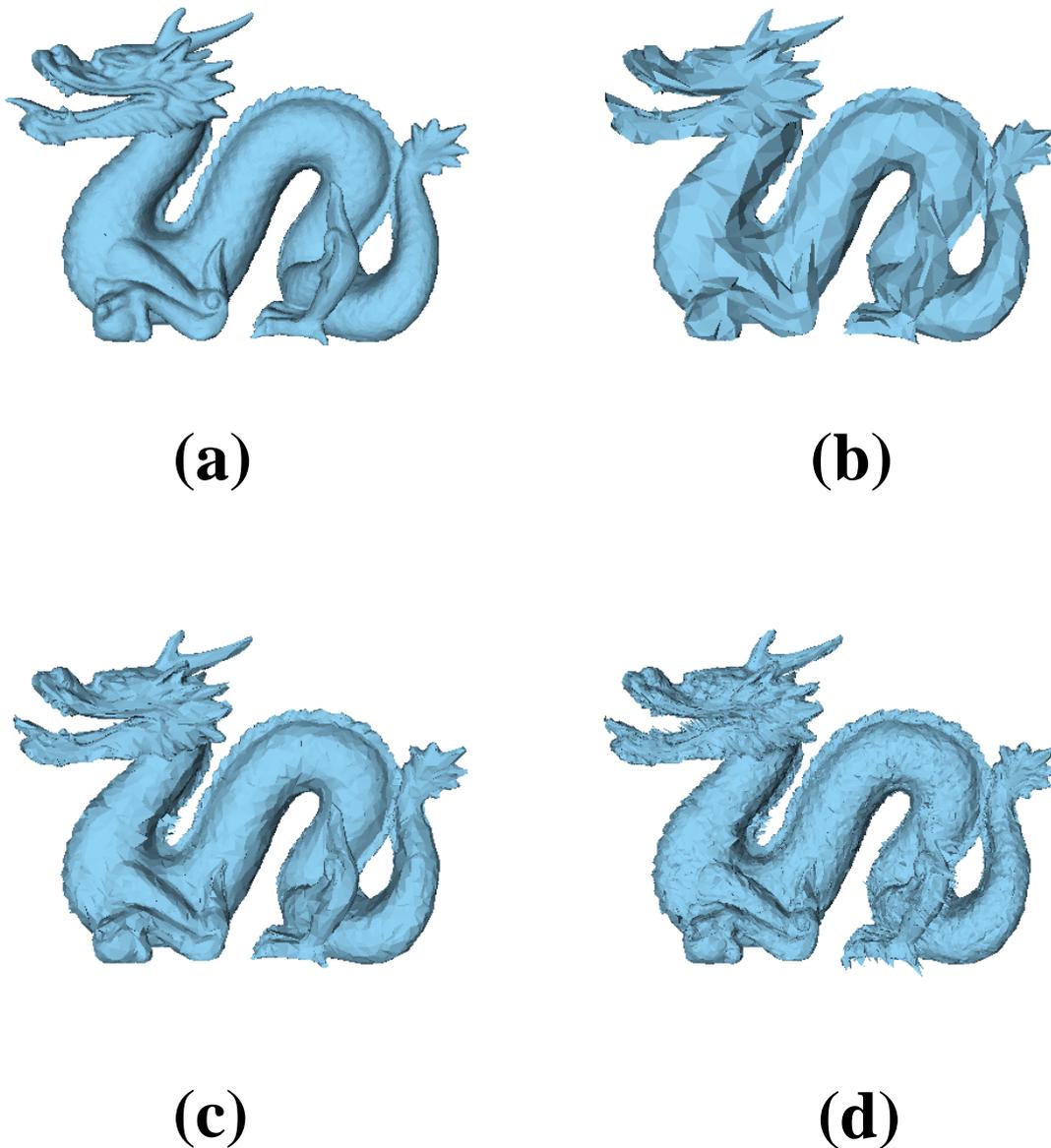


FIGURE 4.18 – Le modèle "Dragon" attaqué par l'addition du bruit aléatoire avec une amplitude de 0,5%. A chaque itération, seuls les sommets nouvellement insérés sont modifiés : (a) Original, (b) Niveau n-6 (3 486 sommets), (c) Niveau n-3 (13 433 sommets), (d) Niveau n (50 000 sommets).

Modèle	MRMS (10^{-3})	BER			Corr		
		Nous	Cho	Wang	Nous	Cho	Wang
Horse	3,18	0,03			0,93		
Bunny	3,33	0,05	0,47	0,15	0,91	0,07	0,70
Dragon	4,25	0,35		0,39	0,26		0,23
Venus	4,18	0,11		0,11	0,77		0,79

TABLEAU 4.5 – Robustesse contre une quantification uniforme de 7 bits des sommets.

changement de la connectivité. Par conséquent, notre algorithme n'est pas robuste aux attaques sur la connectivité.

Dans les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5, nous comparons respectivement les résultats de la robustesse contre l'addition de bruit aléatoire, le lissage et la quantification uniforme des positions des sommets par rapport aux algorithmes de Cho et al. [CPJ07] et de Wang et al. [WLDB11]. Leurs résultats ont été pris de [WLDB11].

Nous pouvons observer que, même si les attaques sont appliquées à de nombreuses reprises à chaque niveau de détails, notre méthode donne des résultats satisfaisants en termes de robustesse par rapport aux algorithmes de Cho et al. [CPJ07] et Wang et al. [WLDB11]. Les taux d'erreur binaire (BER) de notre méthode sont très faibles, entre 5 % et 10 %, dans presque tous les cas, sauf le modèle "Dragon". Néanmoins toutes les autres méthodes sont également fragiles pour ce modèle en raison de sa forme compliquée.

Ces comparaisons doivent être considérées sur une base qualitative en raison de différences entre ces algorithmes et le nôtre ainsi que des protocoles expérimentaux :

- La capacité n'est pas identique (de 45 à 75 bits pour [WLDB11], 67 bits pour [CPJ07] et de 51 à 128 bits pour notre méthode).
- Les attaques sont appliquées de manière itérative pour chaque maillage intermédiaire, sauf le plus fin, pour notre méthode, alors que ces attaques sont appliquées une seule fois sur la maillage le plus fin pour les autres algorithmes.
- Notre méthode nécessite une information de clé (le centre de gravité v_c et Δ) pour l'extraction du tatouage, tandis que les autres méthodes ne nécessitent aucune information supplémentaire.

La raison de la robustesse de notre méthode est suivante : même si la géométrie d'un maillage intermédiaire est modifiée par une attaque, ses sommets modifiés sont utilisés dans le mécanisme de prédiction pour insérer les sommets du niveau de détail suivant. Autrement dit, les sommets du niveau actuel et les sommets du niveau suivant sont modifiés de manière similaire et la relation des centres de masse des deux histogrammes n'est pas modifiée significativement.

L'effet des différentes attaques est illustré dans les figures 4.19, 4.20 et 4.21 dans lesquelles les attaques d'addition de bruit aléatoire, de lissage et de quantification sont appliquées successivement à chaque itération de la décompression sur les modèles "Bunny", "Horse" et "Venus".

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de tatouage réversible conjoint à la compression progressive de maillage 3D. Chaque niveau de détail est encodé et tatoué en modifiant la géométrie de sommets insérés par rapport au centre de masse du maillage original. Le processus de tatouage est réversible au sens que la modification géométrique introduite par l'insertion du tatouage peut être enlevée après l'extraction. La méthode proposée est robuste contre le bruit de canal et les attaques intentionnelles tout en entraînant un faible coût supplémentaire de codage.

Une perspective intéressante pour ce travail est la manière de décomposer le maillage. En effet, pour l'instant les régions sont générées sans tenir compte de l'importance de la géométrie. Ainsi il serait intéressant de considérer la saillance ou l'analyse fréquentielle dans ce mécanisme de la décomposition, afin d'augmenter la robustesse. Une autre perspective concerne l'extension de la méthode proposée afin d'obtenir une bonne robustesse aux attaques sur la connectivité. Pour cela, on pourrait utiliser une méthode de compression basée sur la reconstruction, comme la méthode de Valette et al. [VCP09]. A chaque étape, on pourrait insérer un sommet tatoué à une arête, si cette arête n'est pas modifiée par l'attaque.

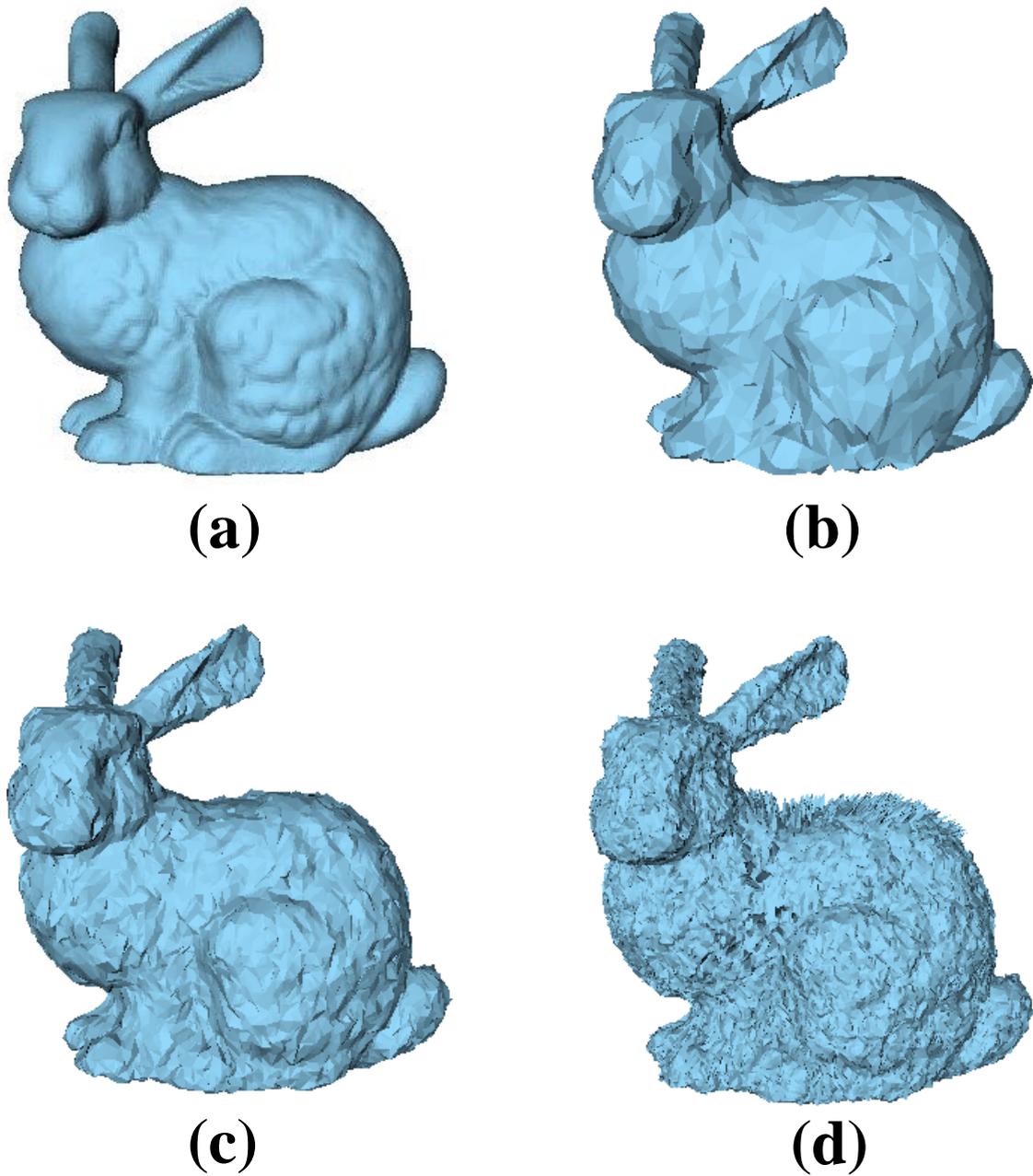


FIGURE 4.19 – Le modèle "Bunny" attaqué par l'addition du bruit aléatoire avec une amplitude de 0,5% : (a) Original, (b) Niveau n-6 (2 273 sommets) après 6 attaques, (c) Niveau n-3 (8 664 sommets) après 9 attaques, (d) Niveau n (34 835 sommets) après 12 attaques.

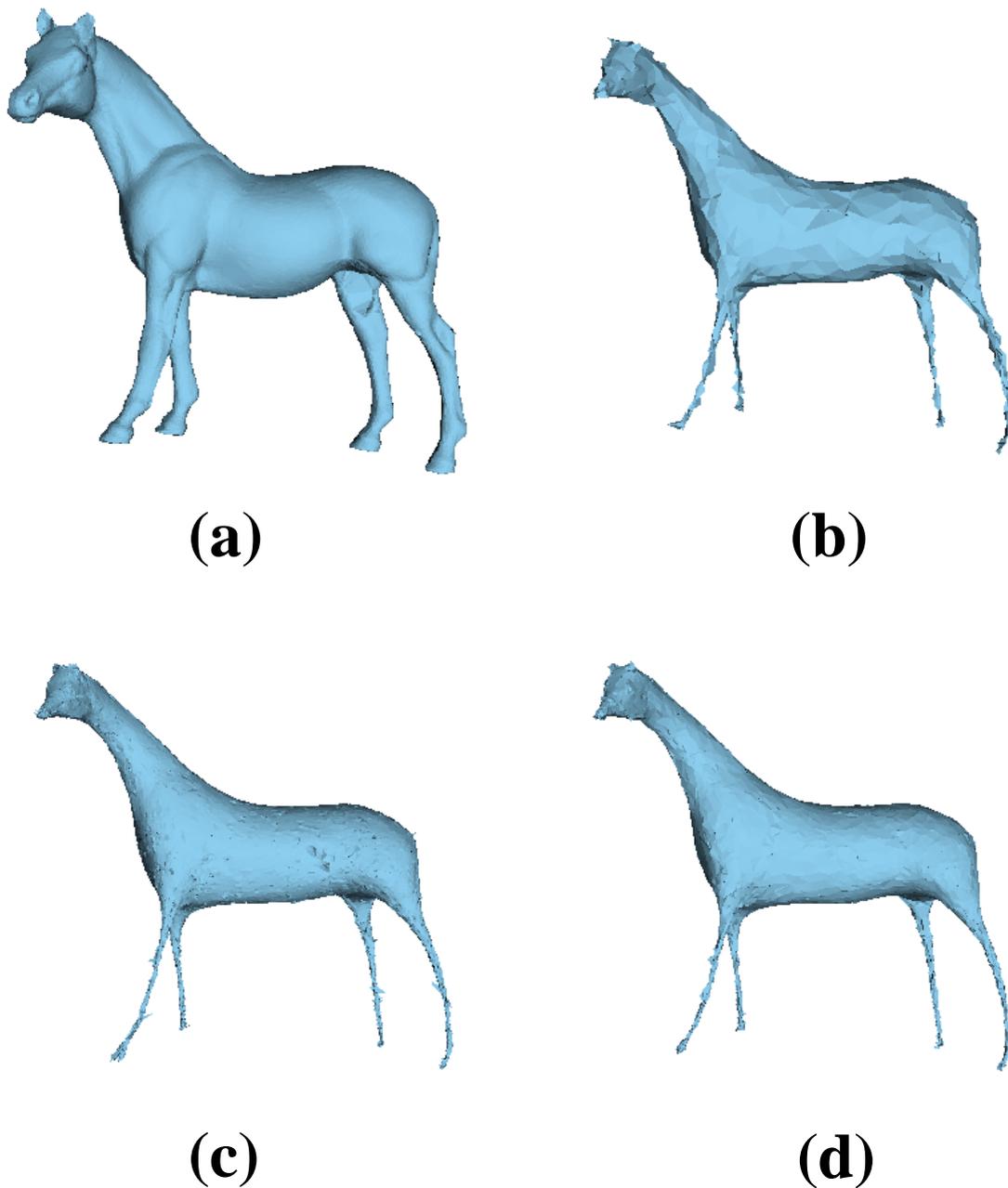


FIGURE 4.20 – Le modèle "Horse" attaqué par le lissage Laplacien avec 30 itérations et un facteur de déformation $\lambda = 0,03$: (a) Original, (b) Niveau n-6 (1 348 sommets) après 5 attaques, (c) Niveau n-3 (5 267 sommets) après 8 attaques, (d) Niveau n (19 851 sommets) après 11 attaques.

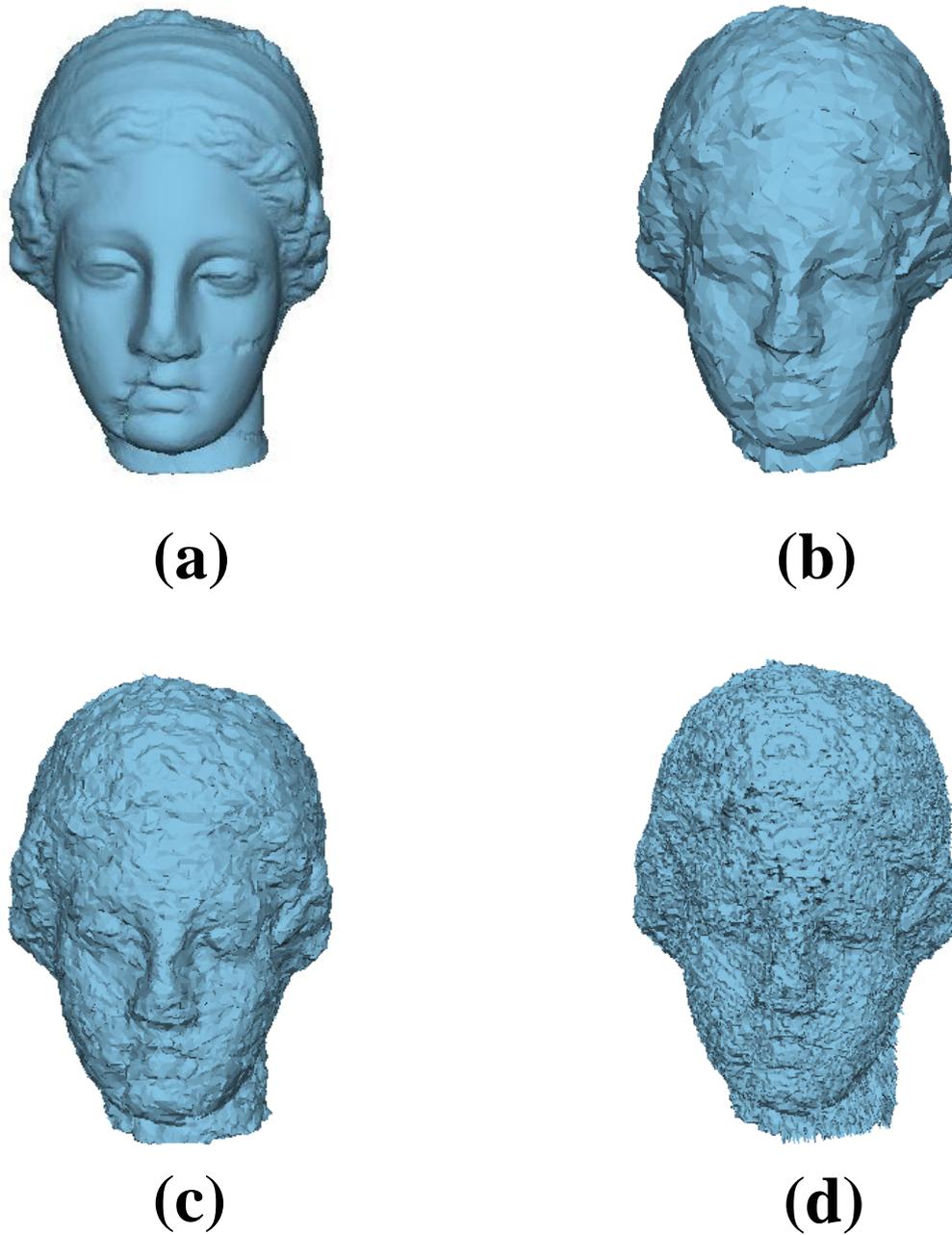


FIGURE 4.21 – Le modèle "Venus" attaqué par la quantification uniforme de 7-bit des sommets : (a) Original, (b) Niveau n-6 (7 054 sommets) après 9 attaques, (c) Niveau n-3 (27 178 sommets) après 12 attaques, (d) Niveau n (100 759 sommets) après 15 attaques.

Conclusion générale

Dans ces travaux de thèse, nous avons étudié le domaine de la compression progressive et le domaine de la compression conjointe au tatouage pour les maillages triangulaires avec attributs de couleur. Nous avons abordé la compression progressive du point de vue de l'optimisation du compromis débit-distorsion pour une transmission efficace de ces données. Cette optimisation a été réalisée en adaptant la précision de quantification de la géométrie et de la couleur à la complexité de chaque maillage intermédiaire, afin de transmettre de manière progressive leurs coordonnées. Nous avons également présenté une méthode conjointe de compression progressive et de tatouage pour une transmission sécurisée des maillages. Afin de protéger chaque niveau de détails durant la transmission, un tatouage robuste est inséré à chaque étape de l'encodage. Le tatouage inséré est particulièrement adapté à notre objectif, puisque l'extraction de ce tatouage permet de reconstruire de manière exacte le maillage original, en éliminant la déformation géométrique provoquée par l'insertion du tatouage.

5.1 Contributions

Les contributions scientifiques de cette thèse peuvent se résumer comme suit :

1. Notre première contribution est d'avoir proposé une méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion pour les maillages sans attributs couleur basée sur l'adaptation de la quantification. Cette adaptation peut s'effectuer de manière optimale à l'aide d'une mesure de distorsion et d'un calcul de l'entropie. Les résultats montrent que notre méthode permet d'améliorer le compromis débit-distorsion par rapport à l'algorithme original [AD01a], et qu'elle donne de résultats très compétitifs par rapport aux méthodes de compression les plus récentes. L'inconvénient

principal de cette méthode d'optimisation est le temps de calcul très élevé. Pour remédier à ce problème, nous avons également proposé une méthode d'optimisation rapide, qui permet de déterminer la précision à l'aide d'un apprentissage. Les résultats obtenus sont très similaires à ceux obtenus par la méthode optimale. Il est important de noter que cette approche d'optimisation du compromis débit-distorsion peut être facilement intégrée dans la plupart des méthodes de compression progressive.

2. La deuxième contribution de ce travail de thèse est le développement d'une méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion pour les maillages avec attributs couleur. Premièrement, une méthode basée sur la prédiction et une autre méthode utilisant la table de correspondance sont proposées pour encoder de manière efficace la couleur associée aux sommets du maillage. Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'optimisation du compromis débit-distorsion qui permet d'adapter à la fois la précision de la géométrie et celle de la couleur à chaque niveau de détail. Afin de réduire le temps de calcul, nous avons introduit une mesure de complexité qui estime rapidement la quantification nécessaire. En outre, dans le but d'améliorer la qualité visuelle, une métrique est proposée pour préserver les éléments caractéristiques liés à la couleur de manière adaptative pour chaque niveau de résolution.
3. La troisième contribution est la proposition d'un algorithme conjoint de compression progressive et de tatouage réversible. Un tatouage robuste basé sur le décalage de classes d'histogramme est inséré à chaque étape de l'encodage afin de protéger chaque niveau de détail. Ce tatouage est particulièrement adapté pour une compression sans pertes grâce à sa propriété de réversibilité ; à l'extraction, la déformation géométrique provoquée par l'introduction du tatouage peut être supprimée et le maillage original (sans déformation) peut donc être reconstruit à la fin de la transmission. Pour augmenter la capacité, les maillages intermédiaires sont décomposés en plusieurs régions. De plus, une nouvelle prédiction géométrique est introduite pour optimiser le coût du codage. Les résultats montrent que le tatouage inséré est robuste contre diverses attaques sur la géométrie pour un faible coût supplémentaire de codage. A notre connaissance, cet algorithme conjoint constitue la première tentative de la compression progressive conjointe au tatouage pour les maillages 3D.

5.2 Perspectives

Les premières perspectives de ce travail de thèse concernent l'amélioration des méthodes d'optimisation du compromis débit-distorsion. Dans la version actuelle, tous les sommets d'un niveau de détail possèdent la même précision de quantification. Certains sommets ont une précision supérieure à ce que nécessaire, on pourrait donc adapter la précision de quantification plus subtilement pour augmenter la performance débit-distorsion. Pour ce faire, on pourrait d'abord décomposer le maillage d'après une analyse géométrique (par exemple une analyse de la courbure, de la saillance ou une analyse fréquentielle), ensuite on pourrait établir une règle pour définir une précision optimale pour chaque région de manière à réduire le temps de calcul. En outre, nous avons l'intention d'adapter la précision pour chaque sommet afin d'améliorer encore le compromis débit-distorsion.

Notre méthode quasi-optimale basée sur un modèle théorique donne des résultats satisfaisants pour les objets lisses. Par contre, pour les maillages dont la surface est plus accidentée, sa performance est dégradée. La principale raison est que le modèle théorique utilisé est établi en n'utilisant que des maillages relativement lisses. Pour remédier à ce problème, nous pouvons calculer les paramètres en utilisant une base plus riche, qui contiendrait non seulement des objets lisses mais aussi des objets plus complexes. Une autre possibilité serait de modifier le modèle théorique utilisé. En effet, le modèle théorique proposé est très simple, n'utilisant que le nombre de sommets, l'aire et le volume. On pourrait prendre en compte plus de caractéristiques géométriques du maillage telles que la courbure, afin d'évaluer plus correctement la complexité géométrique et afin d'estimer de manière plus appropriée la précision optimale, quelque soit la forme du maillage.

Pour l'instant, notre méthode d'optimisation est réalisée de manière locale, en déterminant à chaque itération de l'encodage la meilleure opération. Nous croyons que nous pourrions améliorer d'avantage la performance débit-distorsion en utilisant une approche globale. Pour réaliser cette approche globale, on pourrait dans un premier temps tester tous les chemins possibles, afin de choisir le meilleur chemin. Ensuite, nous pouvons analyser ce meilleur chemin afin d'établir une règle pour une optimisation rapide. La comparaison avec notre approche locale proposée serait également intéressante.

En ce qui concerne l'encodage de la couleur, nous pourrions sous-échantillonner la chrominance, afin de réduire le coût du codage et pour optimiser la performance débit-distorsion. Le sous-échantillonnage de la chrominance est utilisé dans de nombreux systèmes de codage vidéo. Puisque le système visuel humain est beaucoup plus sensible

aux variations de la luminance que de la chrominance, on pourrait consacrer d'avantage de bande-passante pour la composante de luminance que pour celle de chrominance. Ainsi, pendant la transmission, la composante de chrominance serait restaurée pour un sommet sur deux, tandis que la composante de luminance serait restaurée pour tous les sommets.

Les perspectives sur la méthode conjointe de compression et de tatouage concernent l'amélioration de la robustesse. Dans la version actuelle, le maillage est décomposé en plusieurs régions afin d'insérer un bit dans chaque région. La décomposition est réalisée en tenant compte de la connectivité. Il serait intéressant de tenir compte de caractéristiques géométriques dans le mécanisme de décomposition, pour que le bit inséré dans cette région soit plus robuste. La décomposition devrait être robuste aux petites variations de géométrie, afin d'engendrer correctement les régions lors d'une attaque.

Dans notre méthode conjointe, une étape de raffinement est nécessaire pour extraire le tatouage. Le raffinement ne pouvant pas s'effectuer lors d'un changement de la connectivité, notre méthode est fragile contre les attaques sur la connectivité. Il serait intéressant et nécessaire de protéger les maillages intermédiaires contre ce type d'attaque. Pour ce faire, on pourrait insérer le tatouage robuste qui utilise uniquement les éléments du maillage intermédiaire courant comme [CPJ07], [ZTP05] et [WLDB11]. Ces méthodes se basent sur différents descripteurs de forme pour garantir une bonne robustesse. Comme ces techniques ne sont pas réversibles, il faudrait donc de modifier et d'adapter ces descripteurs de forme pour les utiliser dans le contexte du tatouage réversible. Il serait important de tenir en compte du taux de compression, qui est directement lié à la déformation géométrique.

A notre connaissance, il n'existe pas une méthode permettant d'encoder de manière progressive et efficace les maillages polygonaux (comportant également des faces non triangulaires). Pour certaines applications, l'utilisation de ce type de maillage est préférable, puisque l'objet peut être représenté fidèlement avec un nombre réduit d'éléments. Ainsi, il serait intéressant de concevoir un algorithme de compression progressive pour ces maillages.

Il existe des méthodes conjointes qui utilisent le tatouage afin d'améliorer le taux de compression pour les images 2D [CKHN02]. Etant donné que le taux de compression demeure également un problème important dans le domaine de la compression des maillages 3D, il serait intéressant d'insérer un tatouage de haute capacité comme [WDo8, WW09], afin d'utiliser les bits de tatouage dans le mécanisme de prédiction, par exemple, afin de réduire la quantité de données.

Bibliographie

- [AD01a] ALLIEZ P., DESBRUN M. : Progressive compression for lossless transmission of triangle meshes. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (2001), pp. 195–202. xv, xvi, xxi, 17, 18, 22, 25, 26, 36, 42, 45, 46, 51, 54, 87, 109, 125
- [AD01b] ALLIEZ P., DESBRUN M. : Valence-driven connectivity encoding for 3D meshes. *Computer graphics forum* 20, 3 (2001), 480–489. 12, 14, 17, 22
- [AG05] ALLIEZ P., GOTSMAN C. : Recent advances in compression of 3D meshes. *Advances in Multiresolution for Geometric Modelling* 3 (2005), 3–26. 10
- [AKH06] AHN J.-H., KIM C.-s., HO Y.-s. : Predictive compression of geometry, color and normal data of 3-D mesh models. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 16, 2 (Feb. 2006), 291–299. 59
- [Ala04] ALATTAR A. M. : Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform. *IEEE Transactions on Image Processing* 13, 8 (Aug. 2004), 1147–56. 96
- [ALA*10] AHN J.-K., LEE D.-y., AHN M., KIM J. D. K., KIM C., KIM C.-s. : Progressive compression of 3D triangular meshes using topology-based Karhunen-Loève transform. In *IEEE International Conference on Image Processing* (Sept. 2010), pp. 3417–3420. 18
- [Ben99] BENEDENS O. : Geometry-based watermarking of 3D models. *IEEE Computer Graphics and Applications* 19, 1 (1999), 46–55. 94
- [BPZ99a] BAJAJ C., PASCUCCI V., ZHUANG G. : Progressive compression and transmission of arbitrary triangular meshes. *Proceedings of IEEE Visualization* 99 (1999), 307–316. 18
- [BPZ99b] BAJAJ C. L., PASCUCCI V., ZHUANG G. : Single Resolution Compression of Arbitrary Triangular Meshes. In *Proceedings of the Conference on Data Compression* (1999), pp. 247–256. 11, 14, 18, 58

- [CC10] CHEN H.-K., CHEN Y.-H. : Progressive watermarking on 3D meshes. In *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)* (Mar. 2010), pp. 1–7. 98
- [CDTK99] CARSTENS H., DEUBER W., THUMSER W., KOPPENRADE E. : Geometrical Bijections in Discrete Lattices. *Combinatorics, Probability and Computing* 8, 1&2 (Jan. 1999), 109–129. 28, 29
- [CFB06] CALDELLI R., FILIPPINI F., BARNI M. : Joint near-lossless compression and watermarking of still images for authentication and tamper localization. *Signal Processing : Image Communication* 21, 10 (Nov. 2006), 890–903. 98
- [CH11] COURBET C., HUDELLOT C. : Taylor Prediction for Mesh Geometry Compression. *Computer Graphics Forum* 30, 1 (2011), 139–151. 13
- [Cho97] CHOW M. : Optimized geometry compression for real-time rendering. In *Proceedings of IEEE Visualization* (1997), pp. 347–354. 21
- [Choo7] CHO J.-W. : *Watermarking, Compression, and Their Combination for 3-D Triangular Meshes*. Phd thesis, INSA de Lyon, 2007. 98
- [CKHN02] CAMPISI P., KUNDUR D., HATZINAKOS D., NERI A. : Compressive Data Hiding : An Unconventional Approach for Improved Color Image Coding. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2002, 2 (2002), 152–163. 128
- [CLD10] CIRIO G., LAVOUÉ G., DUPONT F. : A Framework for Data-Driven Progressive Mesh Compression. In *International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP)* (2010). 61
- [COCI02] COHEN-OR D., COHEN R., IRONY R. : *Multi-way geometry encoding*. Technical report, 2002. 13, 14
- [COLR99] COHEN-OR D., LEVIN D., REMEZ O. : Progressive compression of arbitrary triangular meshes. In *Proceedings of IEEE Visualization* (1999), pp. 67–72. 17
- [COM98] COHEN J., OLANO M., MANOCHA D. : Appearance-preserving simplification. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (1998), pp. 115–122. 61
- [CP]07] CHO J.-W., PROST R., JUNG H.-Y. : An Oblivious Watermarking for 3-D Polygonal Meshes Using Distribution of Vertex Norms. *IEEE Transactions on Signal Processing* 55, 1 (Jan. 2007), 142–155. 94, 100, 119, 128
- [CRAS*03] CAYRE F., RONDAO-ALFACE P., SCHMITT F., MACQ B., MAÎTRE H. : Application of spectral decomposition to compression and watermarking of 3D triangle mesh geometry. *Signal Processing : Image Communication* 18, 4 (Apr. 2003), 309–319. 95

- [CRS98] CIGNONI P., ROCCHINI C., SCOPIGNO R. : Metro : Measuring Error on Simplified Surfaces. *Computer Graphics Forum* 17, 2 (June 1998), 167–174. 37, 42, 113
- [CSTE05] CELIK M., SHARMA G., TEKALP A., E : Lossless generalized-LSB data embedding. *IEEE Transactions on Image Processing* 14, 2 (Feb. 2005), 253–266. 95
- [CVP*10] CHO J. W., VALETTE S., PARK J. H., JUNG H. Y., PROST R. : 3-D mesh sequence compression using wavelet-based multi-resolution analysis. *Applied Mathematics and Computation* 216, 2 (Mar. 2010), 410–425. 98
- [DDM03] DE VLEESCHOUWER C., DELAIGLE J.-F., MACQ B. : Circular interpretation of bijective transformations in lossless watermarking for media asset management. *IEEE Transactions on Multimedia* 5, 1 (Mar. 2003), 97–105. 96, 97, 99, 105
- [Dee95] DEERING M. : Geometry compression. *Proceedings of ACM SIGGRAPH (1995)*, 13–20. 10, 12, 58
- [DLG90] DYN N., LEVINE D., GREGORY, JOHN A. : A butterfly subdivision scheme for surface interpolation with tension control. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 9, 2 (Apr. 1990), 160–169. 16
- [FGD02] FRIDRICH J., GOLJAN M., DU R. : Lossless data embedding : new paradigm in digital watermarking. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing* 2002, 1 (2002), 185–196. 95, 98
- [GA03] GUMHOLD S., AMJOUN R. : Higher order prediction for geometry compression. In *Proceedings of the Shape Modeling International (2003)*, pp. 59–66. 14
- [GD02] GANDOIN P., DEVILLERS O. : Progressive lossless compression of arbitrary simplicial complexes. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 21, 3 (2002), 372–379. xv, 18, 19, 61
- [GH97] GARLAND M., HECKBERT P. S. : Surface simplification using quadric error metrics. *Proceedings of ACM SIGGRAPH (1997)*, 209–216. 20, 60, 61
- [GH98] GARLAND M., HECKBERT P. : Simplifying surfaces with color and texture using quadric error metrics. In *Proceedings of IEEE Visualization (1998)*, pp. 263–269. 60, 61
- [GSeq8] GUMHOLD S., STRASSER W. : Real time compression of triangle mesh connectivity. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH (1998)*, pp. 133–140. 12
- [GVSS00] GUSKOV I., VIDIMČE K., SWELDENS W., SCHRÖDER P. : Normal meshes. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH (2000)*, pp. 95–102. 21

- [HDD*93] HOPPE H., DEROSE T., DUCHAMP T., McDONALD J., STUETZLE W. : Mesh optimization. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (1993), pp. 19–26. 15
- [Hop96] HOPPE H. : Progressive mesh. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (1996), pp. 99–108. 15, 16, 61, 95, 98
- [Hop99] HOPPE H. : New quadric metric for simplifying meshes with appearance attributes. In *Proceedings of IEEE Visualization* (1999), pp. 59–66. 60
- [IS03] ISENBURG M., SNOEYINK J. : Compressing texture coordinates with selective linear predictions. In *Computer Graphics International* (2003), pp. 126–131. 60, 63
- [Ise02] ISENBURG M. : Compressing the Property Mapping of Polygon Meshes. *Graphical Models* 64, 2 (Mar. 2002), 114–127. 60
- [KBG02] KARNI Z., BOGOMJAKOV A., GOTSMAN C. : Efficient compression and rendering of multi-resolution meshes. In *Proceedings of IEEE Visualization* (2002), pp. 347–354. 16, 18
- [KCL08] KIM H., CHOI H., LEE K. : Mesh simplification with vertex color. In *Geometric Modeling and Processing* (2008), pp. 258–271. 60
- [KG00] KRONROD B., GOTSMAN C. : Optimized triangle mesh compression using prediction trees. In *Proceedings the Eighth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications* (2000), pp. 406–407. 14
- [KG02] KHODAKOVSKY A., GUSKOV I. : Compression of normal meshes. In *Geometric Modeling for Scientific Visualization* (2002), pp. 189–206. 18
- [KMD*09] KONSTANTINIDES J., MADEMLIS A., DARAS P., MITKAS P., STRINTZIS M. : Blind Robust 3-D Mesh Watermarking Based on Oblate Spheroidal Harmonics. *IEEE Transactions on Multimedia* 11, 1 (Jan. 2009), 23–38. 95
- [Kob00] KOBBELT L. : $\check{3}$ -subdivision. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (2000), pp. 103–112. 23
- [KPR05] KÄLBERER F., POLTHIER K., REITEBUCH U. : FreeLence-coding with free valences. *Computer Graphics Forum* 24, 3 (2005), 469–478. 13, 14
- [KR99a] KING D., ROSSIGNAC J. : Guaranteed 3.67 v bit encoding of planar triangle graphs. In *Canadian Conference on Computational Geometry* (1999), pp. 95–98. 12
- [KR99b] KING D., ROSSIGNAC J. : Optimal bit allocation in 3D compression. *Journal of Computational Geometry, Theory and Applications* 14 (1999), 91–118. 22

- [KSS00] KHODAKOVSKY A., SCHRÖDER P., SWELDENS W. : Progressive geometry compression. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (2000), pp. 271–278. 18
- [KYK*05] KIM S.-Y., YOON Y.-S., KIM S.-M., LEE K.-H., HO Y.-S. : Texture Coordinate Compression for 3-D Mesh Models Using Texture Image Rearrangement. In *Advances in Multimedia Information Processing* (2005), pp. 687–697. 60
- [LAD02] LEE H., ALLIEZ P., DESBRUN M. : Angle-analyzer : A triangle-quad mesh codec. *Computer Graphics Forum* 21, 3 (2002), 383–392. 14
- [LCL*06] LEWINER T., CRAIZER M., LOPES H., PESCO S., VELHO L., MEDEIROS E. : GEn-code : Geometry-driven compression for General Meshes. *Computer Graphics Forum* 25, 4 (Dec. 2006), 685–695. 14
- [LCLL10] LIN C.-H., CHAO M.-W., LIANG C.-Y., LEE T.-Y. : A novel semi-blind-and-semi-reversible robust watermarking scheme for 3D polygonal models. *The Visual Computer* 26, 6-8 (Apr. 2010), 1101–1111. 95
- [LK98] LI J., KUO C. : Progressive coding of 3-D graphic models. *Proceedings of the IEEE* (1998), 1052–1063. 21
- [LL08] LU Z., LI Z. : High Capacity Reversible Data Hiding for 3D Meshes in the PVQ Domain. In *IWDW* (2008), pp. 233–243. 97
- [LPG08] LIU Y., PRABHAKARAN B., GUO X. : A robust spectral approach for blind watermarking of manifold surfaces. In *Proceedings of the ACM workshop on Multimedia and security* (2008), pp. 43–52. 95
- [LT00] LINDSTROM P., TURK G. : Image-driven simplification. *ACM Transactions on Graphics (ToG)* 19, 3 (2000), 204–241. 61
- [MDCG10] MAMOU K., DEHAIS C., CHAIEB F., GHORBEL F. : Shape approximation for efficient progressive mesh compression. *IEEE International Conference on Image Processing* (Sept. 2010), 3425–3428. 20, 45
- [MF95] MORONEY N., FAIRCHILD M. : Color space selection for JPEG image compression. *Journal of Electronic Imaging* 4 (1995), 373–381. 62
- [NSA*08] NI Z., SHI Y. Q., ANSARI N., SU W., SUN Q., LIN X. : Robust Lossless Image Data Hiding Designed for Semi-Fragile Image Authentication. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 18, 4 (2008), 497–509. 97
- [OMA97] OHBUCHI R., MASUDA H., AONO M. : Watermaking three-dimensional polygonal models. In *Proceedings of the fifth ACM international conference on Multimedia - MULTIMEDIA '97* (1997), pp. 261–272. 94

- [PA05] PAYAN F., ANTONINI M. : An efficient bit allocation for compressing normal meshes with an error-driven quantization. *Computer Aided Geometric Design* 22, 5 (July 2005), 466–486. 21
- [PHF99] PRAUN E., HOPPE H., FINKELSTEIN A. : Robust mesh watermarking. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (1999), pp. 49–56. 95
- [PHK*10] PENG J., HUANG Y., KUO C.-C. J., ECKSTEIN I., GOPI M. : Feature Oriented Progressive Lossless Mesh Coding. *Computer Graphics Forum* 29, 7 (Sept. 2010), 2029–2038. 20, 45
- [PK05] PENG J., KUO C.-C. J. : Geometry-guided progressive lossless 3D mesh coding with octree (OT) decomposition. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 24, 3 (2005), 609–616. xvi, 19, 40, 42, 45
- [PKJ05] PENG J., KIM C., JAY KUO C. : Technologies for 3D mesh compression : A survey. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 16, 6 (2005), 688–733. 10
- [PR00] PAJAROLA R., ROSSIGNAC J. : Compressed progressive meshes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 6, 1 (2000), 79–93. 16
- [PR04] PUECH W., RODRIGUES J. : A new crypto-watermarking method for medical images safe transfer. In *Proc. 12th European Signal Processing Conference (EUSIPCO'04)* (2004), pp. 1481–1484. 98
- [PRDM07] PUECH W., RODRIGUES J. M., DEVELAY-MORICE J. E. : A new fast reversible method for image safe transfer. *Journal of Real-Time Image Processing* 2, 1 (Oct. 2007), 55–65. 96
- [RCPA01] RIGIROLI P., CAMPADELLI P., PEDOTTI A., ALBERTO BORGHESE N. : Mesh refinement with color attributes. *Computers & Graphics* 25, 3 (2001), 449–461. 61
- [RFK*06] ROY M., FOUFOU S., KOSCHAN A., TRUCHETET F., ABIDI M. : Multiresolution analysis for meshes with appearance attributes. In *IEEE International Conference on Image Processing* (2006), pp. 816–819. 77, 84, 87
- [Ros99] ROSSIGNAC J. : Edgebreaker : Connectivity compression for triangle meshes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 5, 1 (1999), 47–61. 12, 14
- [SKL03] SIM J., KIM C., LEE S. : An efficient 3D mesh compression technique based on triangle fan structure. *Signal Processing : Image Communication* 18, 1 (Jan. 2003), 17–32. 13

- [SKP*01] SEO Y., KIM M., PARK H., JUNG H., CHUNG H., HUH Y., LEE J. : A secure watermarking for JPEG-2000. In *IEEE International Conference on Image Processing* (2001), pp. 530–533. 97
- [SKR00] SZYMCZAK A., KING D., ROSSIGNAC J. : An Edgebreaker-based efficient compression scheme for regular meshes. In *Proceedings of Canadian Conference on Computational Geometry* (Oct. 2000), vol. 20, pp. 257–264. 12
- [SSGH01] SANDER P. V., SNYDER J., GORTLER S. J., HOPPE H. : Texture mapping progressive meshes. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, August (2001), 409–416. 61
- [SWK01] SU P., WANG H., KUO C. : An integrated approach to image watermarking and JPEG-2000 compression. *The Journal of VLSI Signal Processing* 27, 1 (2001), 35–53. 97
- [Tau95] TAUBIN G. : A signal processing approach to fair surface design. *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (1995), 351–358. 95
- [TG98] TOUMA C., GOTSMAN C. : Triangle mesh compression. In *Graphics Interface 98 Conference Proceedings* (Dec. 1998), pp. 26–34. 11, 12, 13, 14, 17, 22
- [TGH198] TAUBIN G., GUÉZIEC A., HORN W., LAZARUS F. : Progressive forest split compression. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (1998), pp. 123–132. 16
- [THLR98] TAUBIN G., HORN W., LAZARUS F., ROSSIGNAC J. : Geometry coding and VRML. *Proceedings of the IEEE* 86, 6 (1998), 1228–1243. 60
- [Tiao3] TIAN J. : Reversible data embedding using a difference expansion. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 13, 8 (2003), 890–896. 96
- [TR98] TAUBIN G., ROSSIGNAC J. : Geometric compression through topological surgery. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 17, 2 (1998), 84–115. 11, 13, 16
- [TR07] THODI D. M., RODRIGUEZ J. J. : Expansion Embedding Techniques for Reversible Watermarking. *IEEE Transactions on Image Processing* 16, 3 (Mar. 2007), 721–730. 96
- [Tur84] TURÁN G. : On the succinct representation of graphs. *Discrete Applied Mathematics* 8, 3 (July 1984), 289–294. 11
- [VCP09] VALETTE S., CHAINE R., PROST R. : Progressive Lossless Mesh Compression Via Incremental Parametric Refinement. *Computer Graphics Forum* 28, 5 (July 2009), 1301–1310. 19, 21, 45, 120
- [VLo8] VALLET B., LÉVY B. : Spectral geometry processing with manifold harmonics. *Computer Graphics Forum* 27, 2 (Apr. 2008), 251–260. 95

- [VP04] VALETTE S., PROST R. : Wavelet-based progressive compression scheme for triangle meshes : Wavemesh. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 10, 2 (2004), 123–129. 18, 45
- [WA02] WONG P., AU O. : A blind watermarking technique in JPEG compressed domain. In *IEEE International Conference on Image Processing* (2002), pp. 497–500. 97
- [WDo8] WU H.-T., DUGELAY J.-L. : Reversible watermarking of 3D mesh models by prediction-error expansion. In *IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing* (Oct. 2008), pp. 797–802. 97, 128
- [WLDB08] WANG K., LAVOUE G., DENIS F., BASKURT A. : A Comprehensive Survey on Three-Dimensional Mesh Watermarking. *IEEE Transactions on Multimedia* 10, 8 (Dec. 2008), 1513–1527. 94
- [WLDB11] WANG K., LAVOUÉ G., DENIS F., BASKURT A. : Robust and blind mesh watermarking based on volume moments. *Computers & Graphics* 35, 1 (Feb. 2011), 1–19. 94, 119, 128
- [WW09] WU D., WANG G. : A Reversible Watermarking Scheme for 3D Meshes. In *Active Media Technology* (2009), pp. 513–521. 97, 128
- [XA98] XIE L., ARCE G. : Joint wavelet compression and authentication watermarking. In *IEEE International Conference on Image Processing* (1998), pp. 427–431. 97
- [YI10] YANG Y., IVRISSIMTZIS I. : Polygonal mesh watermarking using Laplacian coordinates. *Computer Graphics Forum* 29, 5 (Sept. 2010), 1585–1593. 95
- [YIK03] YU Z., IP H. H., KWOK L. : A robust watermarking scheme for 3D triangular mesh models. *Pattern Recognition* 36, 11 (Nov. 2003), 2603–2614. 94
- [YKH06] YOON Y.-s., KIM S.-y., HO Y.-s. : Color Data Coding for Three-Dimensional Mesh Models Considering Connectivity and Geometry Information. In *IEEE International Conference on Multimedia and Expo* (July 2006), pp. 253–256. xvi, 59, 82
- [ZSS96] ZORIN D., SCHRÖDER P., SWELDENS W. : Interpolating Subdivision for meshes with arbitrary topology. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (1996), pp. 189–192. 16
- [ZTP05] ZAFEIRIOU S., TEFAS A., PITAS I. : Blind robust watermarking schemes for copyright protection of 3D mesh objects. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 11, 5 (2005), 596–607. 94, 128

Publications de l'auteur

Revues internationales

- **H. Lee**, C. Dikici, G. Lavoué, F. Dupont : Joint reversible watermarking and progressive compression of 3D meshes. *The Visual Computer - International Journal of Computer Graphics*, 27(6-8) :781-792, 2011.
- **H. Lee**, G. Lavoué, F. Dupont : Rate-distortion optimization for progressive compression of 3D mesh with color attributes. *The Visual Computer - International Journal of Computer Graphics*, 2011. (à paraître)

Conférences internationales avec comité de lecture

- A. Maglo, G. Lavoué, C. Hudelot, **H. Lee**, C. Mouton, F. Dupont : Remote scientific visualization of progressive 3D meshes with X3D. Dans *International Conference on 3D Web Technology (Web3D)*, pp. 109-116, 2010.
- **H. Lee**, G. Lavoué, F. Dupont : New methods for progressive compression of colored 3D mesh. Dans *International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG)*, pp. 199-206, 2010.
- **H. Lee**, G. Lavoué, F. Dupont : Adaptive coarse-to-fine quantization for optimizing rate-distortion of progressive mesh compression. Dans *Vision, Modeling, and Visualization Workshop (VMV)*, pp. 73-81, 2009.

Conférence nationale avec comité de lecture

- **H. Lee**, G. Lavoué, F. Dupont : Optimisation du rapport débit-distorsion de la compression progressive de maillages par adaptation de quantification. Dans *COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels (CORESA)*, pp. 49-54, 2010.

Titre : Compression progressive et tatouage conjoint de maillages surfaciques avec attributs couleur

Résumé : L'utilisation des modèles 3D, représentés sous forme de maillage, est sans cesse croissante dans de nombreuses applications. Pour une transmission efficace et pour une adaptation à l'hétérogénéité des ressources de ces modèles, des techniques de compression progressive sont généralement utilisées. Afin de protéger le droit d'auteur de ces modèles pendant la transmission, des techniques de tatouage sont également employées. Dans ces travaux de thèse, nous proposons premièrement deux méthodes de compression progressive pour des maillages avec ou sans information de couleurs et nous présentons finalement un système conjoint de compression progressive et de tatouage.

Dans une première partie, nous proposons une méthode d'optimisation du compromis débit-distorsion pour des maillages sans attribut de couleur. Pendant le processus de l'encodage, nous adoptons la précision de quantification au nombre d'éléments et à la complexité géométrique pour chaque niveau de détail. Cette adaptation peut s'effectuer de manière optimale en mesurant la distance par rapport au maillage original, ou de façon quasi-optimale en utilisant un modèle théorique pour une optimisation rapide. Les résultats montrent que notre méthode donne des résultats compétitifs par rapport aux méthodes de l'état de l'art.

Dans une deuxième partie, nous nous focalisons sur l'optimisation du compromis débit-distorsion pour des maillages possédant l'information de couleur attachée aux sommets. Après avoir proposé deux méthodes de compression pour ce type de maillage, nous présentons une méthode d'optimisation du débit-distorsion qui repose sur l'adaptation de la précision de quantification de la géométrie et de la couleur pour chaque maillage intermédiaire. Cette adaptation peut être effectuée rapidement selon un modèle théorique qui permet d'évaluer le nombre de bits de quantification nécessaire pour chaque maillage intermédiaire. Une métrique est également proposée pour préserver les éléments caractéristiques durant la phase de simplification.

Finalement, nous proposons un schéma conjoint de compression progressive et de tatouage. Afin de protéger tous les niveaux de détails, nous insérons le tatouage dans chaque étape du processus d'encodage. Pour cela, à chaque itération de la simplification, nous séparons les sommets du maillage en deux ensembles et nous calculons un histogramme de distribution de normes pour chacun d'entre eux. Ensuite, nous divisons ces histogrammes en plusieurs classes et nous modifions ces histogrammes en décalant les classes pour insérer un bit. Cette technique de tatouage est réversible et permet de restaurer de manière exacte le maillage original en éliminant la déformation induite par l'insertion du tatouage. Nous proposons également une nouvelle méthode de prédiction de la géométrie afin de réduire le surcoût provoqué par l'insertion du tatouage. Les résultats expérimentaux montrent que notre méthode est robuste à diverses attaques géométriques tout en maintenant un bon taux de compression.

Mots Clés : Maillages surfaciques, compression progressive, attributs couleur, optimisation du compromis débit-distorsion, adaptation de quantification, compression et tatouage conjoint.