



HAL
open science

Cartes de saillance et évaluation de la qualité des maillages 3D

Anass Nouri

► **To cite this version:**

Anass Nouri. Cartes de saillance et évaluation de la qualité des maillages 3D . Vision par ordinateur et reconnaissance de formes [cs.CV]. Normandie Université, France, 2016. Français. NNT: . tel-01418334

HAL Id: tel-01418334

<https://hal.science/tel-01418334>

Submitted on 16 Dec 2016

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

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



Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité INFORMATIQUE

Préparée au sein de l'ENSICAEN et de l'UNICAEN

Cartes de saillance et évaluation de la qualité des maillages 3D

**Présentée et soutenue par
Anass NOURI**

**Thèse soutenue publiquement le 2 Décembre 2016
devant le jury composé de**

Monsieur / Olivier LÉZORAY	Professeur des Universités, Université de Caen Normandie	Directeur de thèse
Monsieur / Christophe CHARRIER	Maître de Conférences HDR, Université de Caen Normandie	Codirecteur de thèse
Monsieur / Atilla BASKURT	Professeur des Universités, INSA de Lyon	Rapporteur
Monsieur / Jean-Philippe VANDEBORRE	Professeur de l'Institut Mines-Télécom, Télécom Lille	Rapporteur
Madame / Christine FERNANDEZ-MALOIGNE	Professeur des Universités, Université de Poitiers	Examineur

Thèse dirigée par Olivier LÉZORAY et Christophe CHARRIER, laboratoire GREYC UMR CNRS 6072



Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé au sein de l'équipe Image du laboratoire Groupe de REcherche en Informatique, Image et Instrumentation de Caen (GREYC).

Je tiens à remercier monsieur Olivier Lézoray, Professeur de l'Université de Caen et monsieur Christophe Charrier, Maître de Conférences HDR de l'Université de Caen pour l'honneur qu'il m'ont fait en me proposant ce sujet de thèse et en me faisant confiance. Cette thèse ne serait réussie sans leur partage scientifique, leur investissement, leur écoute et leur aimable attention. Qu'ils voient ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie également Madame Christine Fernandez-Maloigne, Professeur de l'Université de Poitiers, Monsieur Atilla Baskurt, Professeur de l'Université de Lyon et Monsieur Jean-Philippe Vandeborre, Professeur de l'Institut Mines-Télécom d'avoir accepté d'évaluer cette thèse. Je leur exprime toute ma gratitude.

Mes remerciements s'adressent pareillement aux membres du laboratoire GREYC pour leur accueil et leur sympathie. Les personnes qui m'ont soutenues, qu'ils soient Maître de conférences, doctorants, ou ingénieurs, sont nombreuses. Je remercie Matthieu Toutain, Ahcène Sadi, Abdellah El Chakik, Maxime Daisy, François Lozes, Régis Clouard, David Tschumperlé et tous les autres pour leurs conseils avisés.

Je tiens à remercier les Professeurs et Maîtres de conférences de l'Université de Kénitra pour leur encouragement et leur support. Je pense particulièrement à Rajae Touahni, Rochdi Messoussi, Tarik Boujiha et Youssef Mrabet.

J'adresse également mes remerciements à mes amis et camarades qui m'ont soutenu durant les trois années de thèse. Un grand merci à Ibtissam Balar pour son accompagnement dans la vie Caennaise.

Enfin, ma famille, Nazha, Maroua, Mohammed, Otman et Kamal. Je les remercie pour leur amour, leur soutien, et leur foi en moi. Ils n'ont cessé d'alimenter ma motivation durant ces années de thèse.

FR - Résumé

Le regard de tout être humain est attiré par des régions particulières appartenant aux objets (pouvant être représentés par des maillages 3D). Cette attractivité dépend fortement du degré de saillance exposé par ces régions. Le premier objectif de cette thèse est de proposer et de mettre en oeuvre un modèle permettant de détecter automatiquement les zones saillantes sur les maillages 3D non colorés. Nous considérons qu'un noeud du maillage est saillant s'il ressort fortement de son voisinage local et si sa configuration géométrique est différente de celle de ses voisins adjacents. Pour cela nous caractérisons la surface du maillage par un descripteur local sous forme de patch de taille adaptative. Ce dernier est utilisé dans le calcul des similarités et intégré dans le calcul de la carte saillance multi-échelle. Nous proposons également une extension de ce modèle pour la détection de la saillance des maillages colorés.

Quatre applications basées sur le modèle de saillance proposé ont été développées après la validation des résultats de notre modèle sur des maillages non colorés issus d'une pseudo vérité terrain. Les premières et deuxièmes applications concernent respectivement la sélection automatique des points de vues optimaux et la compression adaptative des maillages 3D non colorés. Les troisièmes et quatrièmes applications s'inscrivent respectivement dans le cadre de l'amélioration de détails et du lissage adaptatif des maillages 3D colorés.

Le deuxième objectif de cette thèse consiste à proposer une métrique d'évaluation de la qualité avec référence des maillages 3D. En mettant en entrée de cette métrique un maillage original (supposé parfait sans dégradation) et un deuxième maillage dégradé, le but sera d'évaluer le degré de fidélité du maillage dégradé relativement à sa version de référence en fournissant un score de fidélité qui soit le plus proche possible des scores fournis par les observateurs humains. Étant donné que la saillance visuelle est une information pertinente pour notre système visuel, son utilisation dans le pipeline de la métrique est naturel. Nous utilisons deux propriétés des maillages 3D pour évaluer objectivement la qualité : la saillance multi-échelle et la rugosité. En effet, la carte de saillance servira à l'extraction des informations structurelles du maillage 3D et la carte de rugosité à la prise en compte de l'effet de masquage visuel. Nous introduisons quatre fonctions de comparaisons entre deux voisinages locaux correspondants des deux maillages pour

estimer les différences structurelles entre eux. Nous combinons ces dernières par une somme de Minkowski pondérée pour obtenir le score de qualité final.

Le troisième objectif de cette thèse s'inscrit dans la mise en oeuvre d'une métrique d'évaluation de la qualité sans référence d'un maillage 3D. Contrairement à une métrique avec référence, cette catégorie de métriques est considérée comme la plus épineuse pour évaluer objectivement la qualité d'un maillage dégradé dans la mesure où la version de référence du maillage n'est pas utilisée. Similairement à la métrique avec référence, nous supposons que la qualité visuelle d'un maillage 3D est davantage dépréciée lorsque les régions saillantes du maillage sont affectées et vice-versa. Nous commençons par segmenter le maillage en un nombre de superfacettes qui joueront le rôle de patchs locaux dans ce contexte. Nous affectons à chaque noeud d'une superfacette ses valeurs de saillance et de rugosité respectives puis nous extrayons quatre caractéristiques locales de chaque superfacette (moyenne de la saillance, écart type de la saillance, covariance de la saillance et la moyenne de la rugosité). Les variations de ces quatre caractéristiques quantifient les distorsions que peut subir un maillage. Finalement, nous effectuons un apprentissage basé sur les Séparateurs à Vastes Marges (SVM) en utilisant le vecteur de caractéristiques construit : puis pour passer d'une représentation vectorielle du maillage à un score de qualité final, nous utilisons une régression par SVMs.

EN - Abstract

The glance of each human being is attracted by specific areas into 3D objects (that can be represented by meshes). This attraction depends on the degree of saliency exposed by these areas. The first goal of this thesis is to propose an approach for detecting visual salient areas on 3D non-colored meshes. We consider that a vertex as salient if it strongly stands out from its local neighborhood and if its geometric configuration is different from its adjacent vertices. For this, we characterize the surface of the 3D mesh by the use of a local vertex descriptor in the form of an adaptive patch. This descriptor is used as a basis for similarity computation and integrated into a weighted multi-scale saliency computation. We propose also an extension of our visual saliency model to 3D colored meshes.

Four saliency-based applications were developed after the validation of the saliency detection results with a pseudo ground truth. The first and the second one concern respectively the optimal viewpoint selection and the adaptive compression of 3D non colored meshes. The third one sharpens the details of a 3D colored mesh, and the fourth smooths adaptively its colors.

The second aim is to propose a novel perceptual full reference metric for the quality assessment of 3D meshes. Given a 3D reference mesh (reputed devoid from any distortions) and a 3D distorted mesh as inputs of this metric, the goal is to assess the perceived quality of the distorted mesh by providing a fidelity score which must be as close as possible to the humans scores. As visual saliency is a pertinent information for our visual system, its use in the pipeline of the quality metric is natural. We use two properties of 3D meshes for evaluating their perceived quality : the visual saliency and the roughness. The multi-scale saliency map is used for the extraction of the structural informations of the 3D mesh and the roughness map for the account of the visual masking effect. We introduce 4 comparison functions between 2 corresponding local neighborhoods in order to estimate the structural differences between them. We combine these functions with a weighted Minkowski sum so as to obtain a final quality score.

The third objectif of this thesis is to provide an approach for the difficult problem of the no reference quality assessment of 3D meshes. On the contrary to full reference metrics, this category is considered as the thorniest since the reference version of the

3D mesh is not used. Similarly to the full reference metric, we suppose that the visual quality of a 3D mesh is more affected when the salient areas of the mesh are affected and vice versa.

We begin by segmenting the mesh into a number of Superfacets which represent the local patches in this context. Then we affect to each vertex of a Superfacet its respective values of saliency and roughness. Afterward, we extract four local characteristics of each Superfacet (mean saliency, standard-deviation saliency, covariance saliency and mean roughness). Variations of these 4 characteristics quantify effectively the distortions that a mesh may undergo. Finally, we perform a learning step based on SVMs (Support Vectors Machines) using the constructed feature vector : to move from a vectorial representation to a final quality score, we use a regression SVM scheme.

Table des matières

Introduction	13
Contexte et objectifs	13
Contributions	14
Plan de lecture	15
I Saillance visuelle des maillages 3D	17
1 Détection de la saillance visuelle des maillages 3D	19
1.1 Introduction	19
1.2 Saillance visuelle : explication physiologique	20
1.2.1 Processus attentionnels	21
1.2.2 Théorie de l'attention visuelle	22
1.2.2.1 Théorie de l'intégration des caractéristiques	22
1.2.2.2 Guided Search model	24
1.2.3 Mouvements oculaires	24
1.2.3.1 Mouvements oculaires et attention visuelle	24
1.2.3.2 Une meilleure acuité au centre du regard	25
1.2.3.3 Différents types de mouvements oculaires	26
1.3 État de l'art sur la détection de la saillance	26
1.3.1 Saillance visuelle des maillages 3D	27
1.3.1.1 Différents modèles de l'état de l'art	27
1.3.1.2 Modèles de l'état de l'art servant de référence	29
1.3.1.3 Discussion	35
1.4 Saillance visuelle des maillages 3D non colorés par patchs locaux adaptatifs	35
1.4.1 Motivation	35
1.4.2 Concepts et notations sur graphes	36
1.4.3 Modélisation de la surface d'un maillage 3D	37
1.4.4 Construction des descripteurs locaux : les patchs locaux adaptatifs	38
1.4.5 Saillance mono-échelle	40

1.4.6	La contribution de la courbure et du coefficient de poids de distance dans le calcul de la saillance mono-échelle	41
1.4.7	L'influence du nombre de cellules des patchs et du voisinage sphérique dans le calcul de la saillance	43
1.4.8	Calcul de la saillance multi-échelle	45
1.4.9	Extension à la saillance des maillages 3D colorés	47
1.5	Résultats et validation de la saillance visuelle détectée sur les maillages 3D non colorés	48
1.5.1	Comparaison avec une pseudo vérité terrain	48
1.5.2	Analyse et comparaison avec l'état de l'art	49
1.5.3	Robustesse et stabilité	53
1.6	Résultats de la saillance visuelle détectée sur les maillages 3D colorés . .	58
1.6.1	Construction d'une base de maillages colorés	58
1.6.2	Analyse et résultats	60
1.6.3	Robustesse au bruit géométrique et au bruit sur les couleurs . .	65
1.7	Conclusion et perspectives	65
2	Champs d'application de la saillance visuelle des maillages 3D	69
2.1	Introduction	69
2.2	Application à la sélection des points de vue optimaux des maillages non colorés	70
2.3	Application à la compression adaptative des maillages 3D non colorés . .	75
2.4	Application à la manipulation des détails des maillages 3D colorés . . .	76
2.5	Application au lissage adaptatif et au débruitage des maillages 3D colorés	79
2.6	Conclusion et perspectives	81
II	Evaluation de la qualité des maillages 3D	85
3	Métrie de l'évaluation de la qualité avec référence des maillages 3D non colorés	87
3.1	Préambule	87
3.1.1	Le système visuel humain et la perception de la qualité	88
3.1.1.1	L'effet du masquage visuel	88
3.1.1.2	La perception de la qualité des maillages 3D	88
3.1.2	Évaluation subjective de la qualité	89
3.1.3	Évaluation objective de la qualité	90
3.2	Etat de l'art des métriques de qualité des maillages 3D non colorés . . .	92
3.2.1	$3DWPM_1$ et $3DWPM_2$	92
3.2.2	MSDM	94

3.2.3	MSDM2	96
3.2.4	FMPD	98
3.2.5	TPDM	100
3.3	Métrique d'évaluation de la qualité des maillages 3D avec référence basée sur la saillance visuelle	102
3.3.1	Synopsis	102
3.3.2	Motivation : La qualité visuelle et la saillance visuelle	103
3.3.3	La carte de saillance pour l'extraction des informations structurales du maillage 3D	104
3.3.4	La carte de rugosité pour la prise en compte du masquage visuel	106
3.3.5	Apprentissage et prédiction du score de qualité	108
3.3.6	Résultats et analyse	109
3.3.6.1	Bases de maillages 3D et scores subjectifs de la qualité	109
3.3.6.2	Performance et comparaison avec l'état de l'art	110
3.4	Conclusion et perspectives	114
4	Métrique d'évaluation sans référence de la qualité des maillages 3D non colorés	117
4.1	Introduction	117
4.2	Approche proposée	118
4.2.1	Principe	118
4.2.2	Méthode	118
4.2.3	Segmentation, apprentissage et regression	119
4.2.3.1	Segmentation du maillage en superfacettes	119
4.2.3.2	Apprentissage et régression	121
4.2.4	Résultats et analyse	122
4.2.4.1	Performance et comparaison avec l'état de l'art	122
4.3	Conclusion et perspectives	124
	Conclusion générale et perspectives	127
	Bibliographie	139
	Annexes	147
A.1	Saillance visuelle des images 2D	147
A.1.1	Modèle de saillance d'Itti et al.	147
A.1.2	Modèle d'Achanta et al.	148
A.1.3	Corrélation de Spearman	148

Introduction

Contexte et objectifs

Depuis que les êtres humains ont commencé à transcrire des informations sur le papyrus, le parchemin et la soie, ils ont toujours essayé de projeter le monde 3D environnant sur d'autres supports le reflétant au mieux. Après le son et les images dans les années 80 et la vidéo dans les années 90, les données tridimensionnelles (3D) représentent le contenu émergent actuel. Ceci a été possible grâce aux avancées technologiques notoires qu'a connu le domaine de l'informatique et des télécommunications en terme de vitesse des ordinateurs et de capacité mémoire parallèlement à la capacité en bande passante des canaux de transmission.

Actuellement, les modèles 3D sont créés ou acquis de diverses façons : tomographie, scanners 3D, reconstruction à partir d'images 2D, logiciels dédiés etc. Par conséquent ces données 3D sont présentées sous plusieurs formes telles que les nuages de points, les éléments volumiques et les maillages triangulaires. Ces derniers sont de loin les plus utilisés en raison de leurs propriétés algébriques et de leur facilité d'utilisation et d'intégration en informatique graphique. Ainsi, les maillages 3D sont utilisés dans plusieurs domaines. L'industrie médicale les utilise pour l'analyse d'organes et pour représenter des composants chimiques de manière détaillée. Le domaine architectural utilise les maillages 3D pour modéliser et visualiser les bâtiments, les ponts, etc. Le domaine automobile utilise les maillages 3D pour représenter les nouveaux concepts et designs. Les maillages 3D trouvent également leur place dans l'impression 3D qui connaît de nos jours un essor considérable ainsi que dans les jeux vidéos, le cinéma, la mode, etc. D'autres applications plus futuristes comme l'holoportation [Microsoft, 2016] et la photographie 3D grand-public [Kolev et al., 2014] tirent avantage des maillages 3D. Dans ce contexte, il est évident que la masse et les échanges des maillages 3D ne feront qu'augmenter au fil des années, ce qui amène à de nouveaux challenges concernant la mise en oeuvre d'outils efficaces pour manipuler, rechercher, protéger, compresser, présenter et évaluer la qualité visuelle finale des maillages 3D tout en prenant en compte les facteurs humains. C'est principalement sur les trois derniers volets que porte ce travail de thèse.

La saillance visuelle des maillages 3D non colorés a été très peu appréhendée dans

la littérature en comparaison avec les travaux effectués sur les images 2D. Ainsi le premier volet de cette thèse a pour but de proposer et de mettre en oeuvre une approche permettant de détecter automatiquement les zones saillantes sur les maillages 3D. Pour qu'elle soit pertinente, celle-ci doit être en concordance avec la vision humaine et par conséquent essayer de mimer quelques caractéristiques du système visuel humain.

Le deuxième volet de cette thèse s'inscrit dans l'évaluation de la qualité des maillages 3D non colorés et vise deux objectifs. Le premier est de proposer une métrique d'évaluation de la qualité des maillages 3D avec référence et indépendante de la vue. En mettant en entrée de cette métrique un maillage original (supposé parfait sans dégradation) et un deuxième maillage dégradé, le but de la métrique consiste à évaluer la qualité du maillage dégradé et de fournir un score qui soit le plus proche possible des scores fournis par les observateurs humains. Le deuxième objectif de ce volet vise à mettre en oeuvre une métrique d'évaluation de la qualité des maillages 3D sans référence. Contrairement à une métrique avec référence, cette catégorie est considérée comme la plus épineuse pour évaluer objectivement la qualité d'un maillage dégradé dans la mesure où il n'y a pas d'accès à la version de référence du maillage 3D.

Contributions

La première contribution de ce travail de thèse répond au problème de la détection des régions saillantes sur la surface des maillages 3D non colorés. Après avoir pris en compte quelques propriétés du système visuel humain en relation avec la perception des maillages 3D, nous avons proposé un modèle de saillance basé sur des patches locaux adaptatifs pour les maillages 3D non colorés. Par la suite, étant conscient que la couleur représente un facteur prépondérant dans l'attraction de l'attention visuelle, nous avons étendu ce modèle de saillance pour les maillages 3D colorés. Il est à noter que la saillance colorimétrique des maillages 3D n'a jamais été traitée auparavant dans la littérature. En outre, nous avons développé quatre applications basées sur ce modèle de saillance. La première concerne la sélection automatique des points de vues optimaux, la deuxième s'inscrit dans la compression adaptative des maillages 3D non colorés, la troisième améliore les détails d'un maillage 3D coloré et la quatrième lisse d'une manière adaptative ses couleurs. Afin de tester le modèle de saillance colorimétrique, nous avons construit une base de maillages 3D colorés en scannant divers objets 3D. En effet, il n'existe pas de base de maillages 3D colorés dans la littérature, c'est pour cette raison que nous envisageons de partager notre base de maillages avec la communauté scientifique.

Étant donné que la saillance visuelle représente une information pertinente pour le système visuel humain, nous avons cherché à l'exploiter pour évaluer objectivement la qualité des maillages 3D. La qualité perçue est fortement dépréciée lorsque le maillage

est dégradé sur les zones saillantes et inversement, ainsi nous avons mis en oeuvre une métrique d'évaluation de la qualité des maillages 3D non colorés avec référence.

La qualité des maillages 3D sans référence a également été abordée dans ce travail. Nous avons encore une fois exploité notre modèle de saillance pour estimer les variations structurelles que subissent les régions sur la surface des maillages 3D. Ainsi nous avons proposé une métrique d'évaluation de la qualité sans référence basée sur les variations statistiques de deux propriétés des maillages 3D : la saillance visuelle et la rugosité.

Plan de lecture

La première partie concerne la détection de la saillance visuelle sur la surface des maillages 3D. Nous y exposons les principes physiologiques relatifs à la sensibilité du système visuel humain aux phénomènes de saillance, puis nous décrivons les modèles de l'état de l'art détectant la saillance visuelle sur les maillages 3D non colorés. Nous détaillons ensuite notre modèle de saillance proposé et le validons par une comparaison avec une vérité terrain. Nous analysons également sa robustesse et comparons ses résultats avec quatre méthodes de l'état de l'art. Dans la même partie, nous décrivons la base de maillages colorés construite dans le cadre de cette thèse ainsi que quatre applications intégrant notre modèle de saillance.

La deuxième partie traite de l'évaluation objective de la qualité des maillages 3D non colorés. Nous commençons par établir un état de l'art détaillé des approches d'évaluation de la qualité, ensuite nous décrivons la première métrique proposée relative à l'évaluation avec référence de la qualité perçue des maillages 3D. Nous analysons ses performances en terme de corrélation avec les scores de qualité fournis par les observateurs humains. De la même manière, nous présentons une seconde métrique associée à l'évaluation sans référence de la qualité des maillages 3D et analysons ses performances.



Première partie

Saillance visuelle des maillages 3D

*"CAN YOU TELL WHICH VISUAL ELEMENTS
PEOPLE NOTICE ? ...*

...WE CAN"

Chapitre 1

Détection de la saillance visuelle des maillages 3D

Dans ce chapitre, nous introduisons tout d'abord la saillance visuelle et décrivons les méthodes de l'état de l'art la détectant. Par la suite, nous présentons notre modèle de saillance et validons ses résultats en les comparant avec une pseudo vérité terrain. Une comparaison des résultats du modèle avec ceux de l'état de l'art est également effectuée. Finalement nous présentons la base de maillages colorés construite dans le cadre de cette thèse et présentons ses caractéristiques.



1.1 Introduction

Pour chaque regard en direction d'une scène ou d'un objet, notre attention visuelle se fixe sur des régions particulières distinctes de leurs voisinages. Ces zones, essentiellement proéminentes dans le contexte d'un objet 3D sont dépendantes du contenu de l'objet ou de la scène et indépendantes du comportement ou du vécu de l'observateur [Itti et al., 1998]. Cette faculté de fixation est connue sous le terme d'attention visuelle. Le calcul de la saillance visuelle permettrait de détecter les régions perceptuellement importantes sur la surface d'un maillage 3D. Les modèles de saillance proposés dans la littérature sont inspirés des caractéristiques bas niveau du système visuel humain. Ceci permet de remplacer les attributs géométriques utilisés pour le calcul de la saillance par des attributs perceptuels, et comme confirmé dans [Kim et al., 2010], ces modèles perceptuels réussissent à modéliser correctement le mouvement des yeux de l'observateur humain.

Plusieurs applications dans la vision 3D par ordinateur s'appuient sur la propriété de saillance visuelle. Nous pouvons citer : 1) La sélection des points de vues optimaux [Lee et al., 2005] dont le but est de générer automatiquement le point de vue le plus

informatif et le plus attirant. 2) La simplification adaptative [Shilane and Funkhouser, 2007] qui a pour objectif de compresser davantage les zones non saillantes du maillage 3D afin de préserver au maximum sa qualité. Similairement, d'autres applications telles que le Surface Matching [Gal and Cohen-Or, 2006], le redimensionnement automatique [Jia et al., 2014] et la reconnaissance faciale [Jinho et al., 2004] tirent avantage de la saillance visuelle.

Nous commençons dans ce qui suit par définir la saillance visuelle tout en expliquant les éléments physiologiques impliqués dans la sensibilité du système visuel humain à cette dernière. Ensuite nous décrivons les différents modèles proposés dans la littérature pour prédire ces phénomènes de saillance. Nous continuons notre étude en proposant une nouvelle approche basée sur des patches locaux adaptatifs pour calculer la saillance visuelle des maillages 3D. Une comparaison qualitative et quantitative avec une pseudo vérité terrain est décrite afin de valider notre approche. Ensuite nous analysons les résultats de saillance obtenus sur plusieurs maillages 3D et les comparons avec la littérature. Afin d'exploiter notre modèle de saillance, nous proposons quatre applications tirant profit de la saillance visuelle. La première concerne la sélection automatique des points de vue optimaux, la deuxième répond au problème de la simplification adaptative des maillages 3D, la troisième traite l'amélioration des maillages 3D colorés, et la quatrième lisse adaptativement les couleurs d'un maillage 3D.

1.2 Saillance visuelle : explication physiologique

La quantité et la diversité de l'information visuelle gigantesque véhiculée par le monde qui nous entoure est traitée partiellement par notre système visuel humain en raison de ses capacités finies. Par exemple, le nombre de cellules photosensibles (photorécepteurs) dans la rétine est limité et réparti d'une manière non uniforme. Par conséquent, nous ne percevons nettement ou avec une acuité visuelle maximale qu'une petite partie de notre champ visuel. Celle-ci est placée au centre de notre regard après avoir effectué plusieurs mouvements oculaires. Cette partie restreinte du champ visuel, traitée en détail par notre système visuel contrairement au reste, est sélectionnée à l'aide de mécanismes attentionnels. Plusieurs processus complexes interviennent dans l'attention visuelle. Nous nous intéressons dans cette thèse uniquement à la partie de l'attention qui concerne la saillance visuelle d'une région. La saillance visuelle peut être définie comme l'information perceptuelle permettant à certains objets ou régions de la scène de ressortir fortement de leur voisinage et ainsi d'attirer l'attention visuelle de l'observateur. De ce fait, l'importance de la saillance d'une région dépend de la distinction de cette région de ce qu'il l'entoure. Autrement dit, nous nous préoccupons dans cette thèse des mécanismes attentionnels liés aux propriétés du signal ou stimuli visuel

plutôt qu'à ceux associés aux observateurs humains visualisant la scène ou à la tâche qu'on leur a confié avant la visualisation (voir processus *Bottom-up* et *Top-down* ci-dessous). Ainsi un élément visuel de la scène est dit saillant s'il est facilement remarquable sans a priori fourni à l'observateur ou encore s'il ressort en premier lors de la visualisation de la scène. Cet élément aurait tendance à capter l'attention d'une manière plus importante que les autres éléments de la scène et ainsi à attirer davantage les regards des observateurs. L'attention visuelle nous permet de construire une perception accordée à nos besoins et capacités. La puissance et la rapidité de ce mécanisme s'inscrivent dans la sélection des informations les plus pertinentes de la scène en déplaçant les yeux de l'observateur séquentiellement de régions saillantes en régions saillantes tout en focalisant l'attention.

1.2.1 Processus attentionnels

Il existe deux processus attentionnels dans la vision humaine influençant la focalisation de l'attention visuelle sur une région particulière de la scène :

- 1 **Processus *Bottom-up*** : Les processus *bottom-up* appelés également processus ascendants (de la rétine vers le cerveau) sont des mécanismes exogènes dépendants des propriétés intrinsèques du stimuli ou du signal visuel comme le contraste, la texture, la forme, etc. Aucune volonté de la part de l'observateur n'intervient pour qu'il place ses yeux sur des régions précises de la scène. La saillance dans ce contexte est involontaire et dépend uniquement des attributs visuels de la région en question. (Nous pourrions dire que la région ressort de son voisinage ou "saute au yeux" : *Pop-out effect*).
- 2 **Processus *Top-down*** : Les processus *top-down* appelés également processus descendants (du cerveau vers les muscles oculomoteurs) sont des mécanismes endogènes dépendants de la volonté du sujet et de ce qu'il recherche dans la scène. Ils sont influencés par la tâche fournie à l'observateur, la sémantique du stimuli mais également par son propre vécu.

Les études de ces processus attentionnels ont montré que les mécanismes *bottom-up* sont plus rapides et précèdent les mécanismes *top-down* qui sont plus lents à mettre en oeuvre [Wolfe et al., 2000] [Tatler et al., 2005] [Parkhurst and Neibur, 2002].

Nous nous focalisons dans notre étude sur les processus *bottom-up* qui sont uniquement induits par les propriétés du stimuli et qui ne dépendent aucunement de l'observateur. Ces derniers vont nous permettre de détecter les régions perceptuellement saillantes qui sont aptes à attirer l'attention visuelle de l'observateur.

1.2.2 Théorie de l'attention visuelle

Il est important de présenter quelques éléments de la théorie de l'attention visuelle afin de comprendre comment sont traités les attributs visuels et comment certains prévalent sur d'autres. Nous citons ici la *Feature Integration Theory (FIT)* de Treisman et Gelade (1980) [Treisman and Gelade, 1980] ainsi que le *Guided Search Model (GS)* de Wolf (1989) [Wolfe et al., 1989] qui a apporté quelques modifications à la première.

1.2.2.1 Théorie de l'intégration des caractéristiques

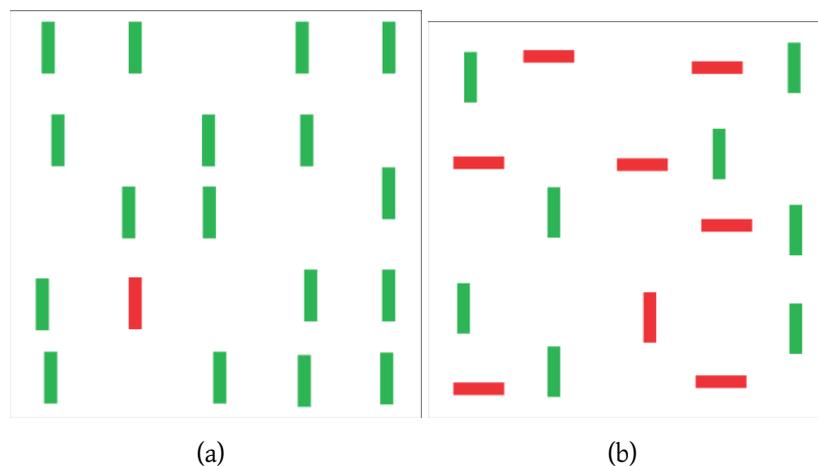


FIGURE 1.1: Exemples de stimuli utilisés dans des tâches de recherche de cible. (Extrait de [Wolfe et al., 2010]) : a) La cible est caractérisée par une couleur différente des distracteurs. La recherche dans ce cas est dite disjonctive et b) La cible partage plusieurs attributs visuels tels que la couleur rouge similaire à celle des distracteurs rouges et l'orientation similaire à celle des distracteurs verts, la recherche est dite conjonctive.

Afin de modéliser les processus attentionnels visuels, Treisman étudie les mécanismes de traitement d'un stimuli visuel pour déterminer si les propriétés du stimuli sont traitées en parallèle ou en série. Pour cela il mesure le temps de réaction nécessaire pour trouver parmi des distracteurs une cible visuellement différente de ces derniers et met en avant deux suppositions : 1) Si l'analyse d'une propriété visuelle peut se faire simultanément sur tout le champ visuel, alors la détection d'une cible unique avec cette propriété prendra un temps constant quelque soit le nombre des distracteurs. 2) Si la recherche d'une cible possédant une propriété particulière est séquentielle, alors le temps requis pour trouver cette cible devrait augmenter linéairement avec le nombre de distracteurs.

Treisman définit alors deux types de recherches associés à deux expériences qui seront à l'origine de la *FIT* :

La recherche disjonctive a lieu lorsque la cible se distingue des distracteurs par une caractéristique visuelle. La figure 1.1(a) présente des distracteurs de couleurs vertes et d'orientations verticales ainsi qu'une cible rouge d'orientation similaire à celle des distracteurs. Dans ce cas le temps de réaction (de recherche) est constant quelque soit le nombre de distracteurs. La cible ressort fortement des distracteurs et attire l'attention visuelle. Cette recherche s'effectue d'une manière parallèle et est qualifiée de pré-attentive. Elle peut être associée aux mécanismes *Bottom-up*.

La recherche conjonctive a lieu lorsque la cible et les distracteurs partagent plusieurs caractéristiques visuelles. La figure 1.1(b) présente une cible représentée par une barre verticale rouge ayant la même orientation que les distracteurs verts et la même couleur rouge que les distracteurs horizontaux. Dans ce cas, le temps de réaction augmente avec le nombre de distracteurs et devient plus important. Cette recherche peut être qualifiée de séquentielle et demande de surcroît une attention volontaire prononcée. Elle peut être associée alors aux mécanismes *Top-down*.

Plusieurs expériences de Treisman concluent que la couleur, l'orientation, la taille, la forme, l'intensité lumineuse, le mouvement font partie des attributs élémentaires pour lesquels la recherche est disjonctive. Ils sont qualifiés d'attributs saillants.

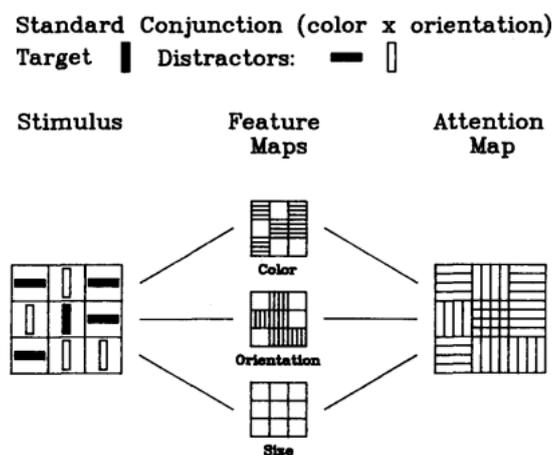


FIGURE 1.2: Cartes d'attribut de couleur, d'orientation, de taille et leur fusion en carte d'attention selon le *Guided Search model* lors d'une recherche conjonctive. [Extrait de [Wolfe et al., 1989]].

La *FIT* stipule que l'information visuelle subit une décomposition en attributs élémentaires distincts dans le cortex visuel. Ces attributs sont traités parallèlement et sont représentés dans des cartes d'attributs spécifiques (figure 1.2). Les différentes cartes d'attributs sont ensuite fusionnées en une carte maîtresse : *Master Saliency Map*. Les endroits mis en évidence sur cette carte font référence aux zones saillantes.

1.2.2.2 Guided Search model

Le *Guided Search model* reprend les principes de la *FIT* (extraction des attributs visuels élémentaires dans des cartes d'attributs spécifiques puis regroupement dans une carte d'activation globale (figure 1.2)) tout en montrant que certaines recherches conjonctives se déroulent d'une manière plus rapide que ce qui est proposé par la recherche séquentielle de la *FIT* [Wolfe et al., 1989]. Il précise que lors d'une recherche conjonctive, les stimuli sont divisés en distracteurs et cibles potentielles et que ceci s'effectue d'une manière parallèle. Ces cibles potentielles sont ensuite analysées séquentiellement ce qui mène à une recherche plus rapide qu'une recherche séquentielle aléatoire.

Une recherche conjonctive d'une barre verticale noire dans l'exemple de la figure 1.2 selon le modèle de Wolfe reviendrait à chercher une barre verticale parmi les stimuli noirs, ou une barre noire parmi les stimuli verticaux ce qui permet d'avoir une recherche optimisée.

Dans une autre étude [Wolfe and Horowitz, 2004], Wolfe propose d'inventorier les attributs perceptifs capables de guider l'orientation de l'attention. Un nombre d'attributs visuels comme la couleur, le mouvement, l'orientation et la taille ont été jugés capables d'orienter l'attention.

1.2.3 Mouvements oculaires

Il existe des liens entre l'attention visuelle et les mouvements oculaires. Nous présentons les types d'attention ainsi que les mouvements oculaires qui leur sont associés.

1.2.3.1 Mouvements oculaires et attention visuelle

Nous distinguons dans la littérature deux types d'attention visuelle :

L'attention cachée (*covert attention*) . Des études ont établi que l'attention n'est pas obligatoirement liée aux mouvements oculaires et qu'elle peut se déplacer indépendamment [Henderson, 2003] [Liversedge and Findlay, 2000]. Ce type d'attention peut être défini comme la mise en exergue d'une région distincte du champ visuel sans le déplacement des yeux vers celle-ci.

L'attention déclarée (*overt attention*) est liée au fait que nous bougions nos yeux vers des régions sur lesquelles notre attention est focalisée. [Deubel et al., 1996] [Hoffman and Subramaniam, 1995] [Kowler et al., 1995] montrent que les mouvements oculaires vers une région sont précédés par un déplacement de l'attention vers cette dernière.

[Findlay, 2004] suggère que dans un contexte comprenant des stimuli complexes ou écologiques, l'étude de l'attention en tant que processus caché ou déclaré serait erronée.

Ceci est en accord avec l'étude de [Rizzolatti et al., 1994] qui montre que l'attention déclarée et cachée sont contrôlées par des mécanismes extrêmement liés et que l'attention visuelle précède les mouvements oculaires.

Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons à l'attention visuelle déclarée (*Overt attention*) qui est suivie (simultanément) de mouvement oculaires. En d'autres termes, vers quelles région déplace-t-on notre attention et par la suite notre regard ? Les modèles de saillance répondent à cette question en prédisant les phénomènes de saillance associées à ces régions.

1.2.3.2 Une meilleure acuité au centre du regard

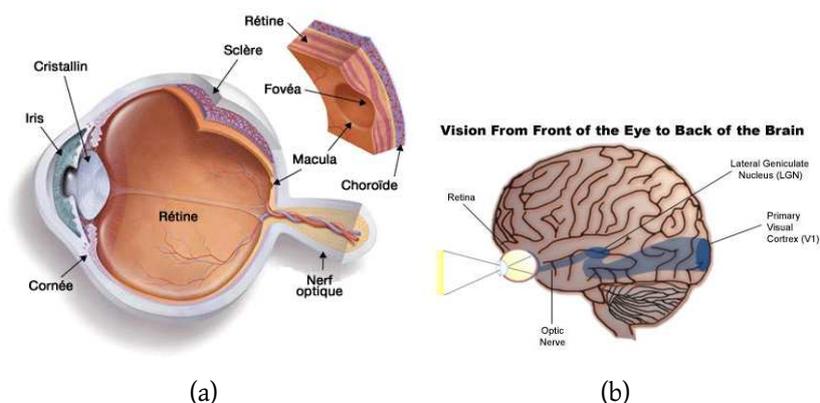


FIGURE 1.3: Organisation du système visuel : a) Rétine (Extrait de [vision du futur,]) et b) Cortex (extrait de [human-eye blog,])

Le système visuel peut être scindé en deux étages principaux : l'étage couplant l'oeil à la rétine et l'étage cortical traitant l'information provenant du couple oeil-rétine (figure 1.3). Le premier étage capte et pré-traite le signal lumineux du monde environnant puis l'envoie au second étage qui le décompose et l'analyse.

La Fovea, zone centrale de la rétine, concentre une grande partie des 130 millions de photorécepteurs répartis non uniformément sur le tapis rétinien. Cette différence de répartition des photorécepteurs joue un rôle important dans notre acuité visuelle. Les zones fixées et mises au centre de la rétine sont analysées plus en détail et bénéficient d'une meilleure résolution que les zones de la scène situées à la périphérie de la rétine. Ceci entraîne la nécessité de déplacer le regard afin d'avoir la région que l'on souhaite analyser minutieusement au centre de la rétine.

Le traitement de l'information par le cortex visuel primaire (V1) confirme également la nécessité du placement des régions cibles au centre du regard. En effet, le traitement des informations provenant de la Fovéa occupe 50% de l'aire V1 du cortex alors que les 50% restant servent à traiter le reste du champ visuel.

1.2.3.3 Différents types de mouvements oculaires

Les mouvements oculaires représentent l'activité des yeux et peuvent être mesurés par des techniques d'occulométrie. Pour cela plusieurs processus existent, toutefois le plus utilisé à cause de son caractère non invasif consiste à filmer le regard des observateurs à l'aide d'une caméra placée sur l'écran. Par conséquent, différents mouvements de l'oeil ont été identifiés [Widdel, 1984] :

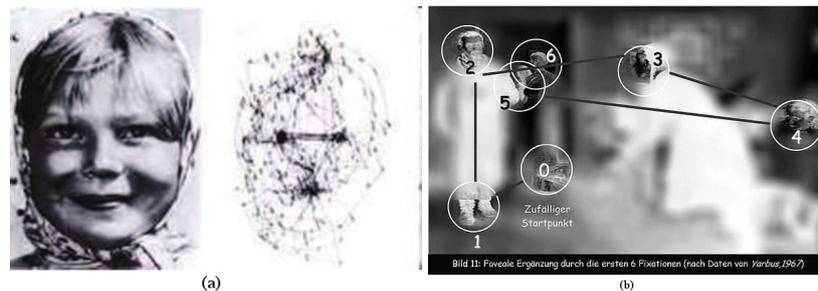


FIGURE 1.4: Points de fixation et parcours oculaire. (Extrait de [Yarbus, 1967]) : a) Observation d'un visage avec un oculomètre et b) Illustration d'un parcours oculaire.

Les saccades : représentent des mouvements très rapides de l'oeil (entre 30 et 80ms) ayant pour but de placer une région spécifique de la scène observée au centre de la fovéa. Entre deux saccades, l'oeil s'immobilise pendant un laps de temps compris entre 250 et 500ms sur un point précis. Ce point est appelé point de fixation. La figure 1.4 illustre ces points de fixations. Les zones nettes font référence aux régions qui ont été fixées par les observateurs (figure 1.4(b)).

Les mouvements de poursuite continue : interviennent lorsque nous regardons un objet en mouvement. Le SVH en ce moment extrait un maximum d'informations en plaçant l'objet au centre de la fovéa. Contrairement aux saccades, ces mouvements ont un caractère continu et sont corrigés continuellement.

Les micro-saccades : sont des mouvements effectués sans interruption. Sans ces mouvements, l'image observée ne seraient pas "rafraîchie" ou "rechargée". Ces derniers permettent aux photorécepteurs de s'activer et de ne pas s'épuiser.

1.3 État de l'art sur la détection de la saillance

Les modèles cherchant à prédire la saillance sur les images 2D sont plus nombreux que ceux des maillages 3D [Liu et al., 2014]. Cependant, nous pouvons noter une grande ressemblance entre tous les modèles proposés. La quasi-totalité des travaux, s'appuie sur la FIT et le GS de Wolfe.

Nous présentons en annexe deux modèles de saillance [Itti et al., 1998] et [Achanta et al., 2009] faisant office de référence dans le domaine des images 2D.

Dans ce qui suit, nous dressons un état de l’art des modèles de saillance relatifs aux maillages 3D non colorés.

1.3.1 Saillance visuelle des maillages 3D

Certains travaux de recherche antérieurs sur la détection de la saillance visuelle des maillages 3D non colorés reprenaient des modèles de saillance définis pour les images 2D et les appliquaient sur des projections 2D des maillages 3D. Cette approche ne prend pas en compte suffisamment le relief du maillage 3D qui constitue pourtant une caractéristique majeure dans la perception des contenus 3D comme mentionné dans [Howard, 2002].

Nous présentons dans cette section uniquement les approches basées modèles utilisant la géométrie du maillage 3D pour prédire la saillance. Plus de détails sur les approches reprenant les modèles de saillance 2D pourront être trouvés dans [Guy and Medioni, 1997], et [Yee et al., 2001]. Les approches de [Lee et al., 2005] [Tal et al., 2012] [Song et al., 2014] feront l’objet par la suite d’une présentation détaillée puisqu’elles nous serviront de méthodes de référence.

1.3.1.1 Différents modèles de l’état de l’art

Dans [Wu et al., 2013], Jin Liang Wu *et al.* détectent les régions saillantes en utilisant un descripteur mesurant le champ de hauteur local dans le voisinage de chaque nœud ; une carte (sous forme d’un carré) [Maximo et al., 2011] des hauteurs est générée pour représenter sa forme. Ensuite, les moments de Zernike sont extraits de ces cartes afin d’avoir une représentation invariante à la rotation. L’aspect multi-échelle du descripteur est mis en œuvre en variant la taille des cartes des hauteurs. Pour calculer en premier lieu la saillance locale, le maillage est segmenté en patches similaires. La saillance des nœuds individuels est obtenue par interpolation des saillances relatives aux patches voisins. Quant à la saillance globale, un regroupement des nœuds en patches, dont la saillance est similaire, est effectué. La saillance globale pour chaque nœud est alors obtenue en cherchant les patches les plus proches et en interpolant leurs saillances respectives. Finalement la saillance visuelle finale d’un nœud est obtenue en combinant et en normalisant les valeurs de la saillance globale et locale.

Dans [Zhao et al., 2013], Zhao *et al.* proposent une méthode de détection de la saillance basée sur l’échantillonnage pour la simplification des maillages 3D. L’approche commence par appliquer un filtre gaussien sur les nœuds du maillage. Ensuite, les paramètres représentant la courbure moyenne et les directions de courbures sont calculés

sur différentes échelles. Les différentes cartes sont filtrées par un filtre median avant d'être combinées pour produire la carte de saillance finale.

Sur le même principe et par les mêmes auteurs [Zhao et al., 2012a], Zhao *et al.* présentent un modèle de saillance basé sur la diffusion du paramètre indice de surface, calculé également dans [Zhao et al., 2012b], par un filtre non local [Buades et al., 2005]. L'application de ce modèle de saillance s'est inscrite dans le cadre de l'alignement des maillages 3D (Mesh Registration) et de la simplification.

Dans [Zhao and Liu, 2012], Yitian et Lui détectent les régions saillantes en diffusant l'indice de surface par l'intermédiaire d'un filtre non local [Buades et al., 2005]. L'approche, basée patches, commence par filtrer le maillage pour supprimer les hautes fréquences et calcule ensuite la similarité entre les nœuds. Ensuite, le maillage est transformé en données volumétriques sur plusieurs échelles. La dissimilarité entre deux patches localisés dans deux sous-voxels permet de générer une carte de dissimilarité. Finalement, la saillance d'un patch proportionnelle à sa dissimilarité est définie par la moyenne de sa saillance sur les différentes échelles.

En incorporant le framework CRF (*Conditional Random Field*) dans une approche permettant de calculer la saillance [Song et al., 2012], Ran Song *et al.* établissent une approche générant en premier lieu une représentation multi-échelle du maillage. Cette information est ensuite combinée en utilisant le CRF afin de labelliser les régions du maillage en régions saillantes et non saillantes. La représentation multi-échelle est calculée par l'application de filtres gaussiens sur un voisinage délimité par un rayon géodésique. Les différences de gaussiennes sont calculées en chaque échelle et représentent le déplacement d'un nœud après l'opération du filtrage. Celles-ci sont ensuite projetées sur la normale associée au nœud cible pour obtenir la carte d'une échelle déterminée. Après calcul des représentations multi-échelle, ces dernières sont intégrées dans le CRF en introduisant une contrainte de consistance entre les nœuds voisins pour augmenter la robustesse de la labellisation de l'approche. Finalement l'assignement d'un label à chaque nœud du maillage dans le CRF est résolu avec l'algorithme Belief Propagation.

Dans [Zhao et al., 2013], Zhao *et al.* proposent une approche pour sélectionner les points d'intérêts par l'estimation de la saillance. Pour supprimer le bruit et rendre la détection des points d'intérêts plus robuste, la méthode commence par lisser le maillage par un filtre bilatéral appliqué sur les normales du maillage tout en utilisant une distance relative au lieu d'une distance absolue. Ensuite la théorie *Retinex* [Elad, 2005] est mise en oeuvre pour renforcer les détails locaux et estimer les propriétés invariantes des points de vue de la surface. Après la segmentation de la surface, la saillance est estimée en fonction de la distance spatiale entre les segments résultants.

1.3.1.2 Modèles de l'état de l'art servant de référence

Modèle de Lee *et al.*

Lee *et al.* [Lee *et al.*, 2005] mesurent la saillance en utilisant un opérateur centre-pourtour sur les courbures gaussiennes dans un espace d'échelles DoG (*Difference Of Gaussians*). L'approche commence par calculer une carte de courbure moyenne C et définit un voisinage pour chaque nœud $N(v)$:

$$N(v, \sigma) = \{x \mid \|x - v\| < \sigma\}$$

où σ représente la distance entre un nœud cible v et son voisin x appartenant à la surface du maillage.

Ensuite une Gaussienne pondérée par la courbure moyenne $C(x)$ est calculée pour chaque nœud :

$$G(v, \sigma) = \frac{\sum_{x \in N(v, 2\sigma)} C(x) \exp[-\|x - v\|^2 / (2\sigma^2)]}{\sum_{x \in N(v, 2\sigma)} \exp[-\|x - v\|^2 / (2\sigma^2)]}$$

La saillance mono-échelle d'un nœud du maillage est alors calculée par la différence absolue des Gaussiennes-pondérées par la courbure moyenne à l'échelle la plus fine et la plus grossière :

$$S(v) = |G(v, \sigma) - G(v, 2\sigma)|$$

Ensuite la saillance multi-échelle finale d'un nœud v sur une échelle i est calculée par :

$$S_i(v) = |G(v, \sigma_i) - G(v, 2\sigma_i)|$$

où σ_i représente l'écart type du filtre gaussien sur une échelle i . Cinq échelles sont utilisées $\sigma_i \in \{2\epsilon, 3\epsilon, 4\epsilon, 5\epsilon\}$ où $\epsilon = 0.3\%$ de la diagonale de la boîte englobante du maillage 3D.

Une fois que les cartes de saillances S_i associées aux différentes échelles i ont été définies, un opérateur non linéaire de suppression est appliqué afin de considérer uniquement les cartes de saillance comprenant peu de pics de saillance. Chaque carte de saillance S_i est normalisée et la valeur maximale de saillance M_i ainsi que la moyenne \bar{m}_i des maxima locaux sont calculées. Finalement, S_i est multipliée par le facteur $(M_i - \bar{m}_i)^2$ et la carte de saillance finale S est définie par la somme des cartes de saillance sur toutes les échelles $S = \sum_i S(f_i)$

La figure 1.5 présente un synopsis de la méthode de Lee [Lee *et al.*, 2005].

Modèle de Tal *et al.* [Tal *et al.*, 2012] Le modèle de Tal *et al.* détecte les régions d'intérêts sur un maillage 3D en considérant à la fois la distinction locale et globale d'un nœud ainsi que les extrémités de la forme à analyser. Pour encoder la géométrie locale de chaque nœud, le descripteur Spin image [Johnson and Hebert, 1999] est utilisé. Une Spin

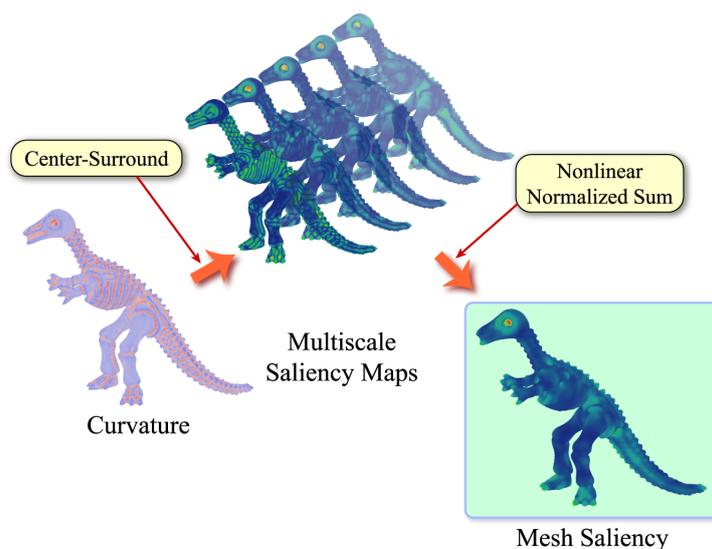
FIGURE 1.5: Synopsis de l'approche de Lee *et al.*

Image est un histogramme 2D reflétant la géométrie locale de chaque nœud en projetant ses voisins sur le plan tangent estimé.

Pour calculer la dissimilarité entre deux histogrammes $D(h_1, h_2)$, Tal *et al.* utilisent la distance de diffusion [Ling and Okada, 2006] :

$$D(h_1, h_2) = \sum_{l=0}^L k(d_l),$$

où

$$d_0 = h_1 - h_2$$

$$d_l = [d_{l-1} * \phi(\sigma)] \downarrow_2, \quad l = 1, \dots, L$$

sont les différents niveaux de la pyramide gaussienne utilisée pour discrétiser le processus de diffusion continu, L représente le nombre de niveaux de pyramides, σ l'écart type du filtre gaussien ϕ , $k(\cdot)$ représente la norme L_1 et \downarrow_2 fait référence à un sous échantillonnage par deux.

Tal *et al.* considèrent un nœud v_i comme distinct lorsque les nœuds v_j qui lui sont similaires sont proches de lui et moins distinct lorsque les nœuds similaires sont situés à une distance plus importante. Par conséquent la mesure de dissimilarité sera inversement proportionnelle à la distance géodésique entre ces nœuds :

$$d(v_i, v_j) = \frac{D(h(v_i), h(v_j))}{1 + c \cdot \text{GeodDist}(v_i, v_j)}$$

où $\text{GeodDist}(v_i, v_j)$ représente la distance géodésique entre v_i et v_j et $c=3$.

La distinction mono-échelle d'un nœud v_i est alors calculée par :

$$D(v_i) = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d(v_i, v_k) \right\}$$

avec K représentant le nombre de nœuds $\{v_k\}_{k=1}^K$ similaires à v_i sur tout le maillage. K est égal à 5% du nombre total des nœuds du maillage.

Afin de réduire l'importance des nœuds appartenant à des textures 3D (nœuds similaires constituant une large région), l'approche calcule les distinctions des nœuds sur trois échelles ($F, F/2, F/4$) avec F représentant le nombre de faces. La valeur de distinction multi-échelle D est définie par la moyenne des valeurs de distinction sur les 3 échelles.

En ce qui concerne la détection des extrémités du maillage, celle-ci se fait en trois étapes :

- 1 Transformation du maillage 3D par la transformée MDS (*multi-dimensional scaling*) de telle manière à ce que la distance euclidienne entre ses nœuds devienne équivalente à la distance distance géodésique.
- 2 La présence ou non d'extrémités sur un maillage est définie par le ratio $\frac{V_{CH}}{V_O}$ où V_{CH} représente le volume de l'enveloppe convexe du maillage transformé et V_O le volume du maillage original. Si $\frac{V_{CH}}{V_O} > 1.5$ alors l'objet comprend bien des extrémités. En effet, le volume d'un objet rond ne contenant pas d'extrémités est équivalent au volume de son enveloppe convexe. A contrario, si le maillage contient des extrémités, le volume de l'enveloppe convexe de sa version transformée diffère de son volume original.
- 3 Un nœud v est situé à l'extrémité du maillage \mathcal{M} lorsque la condition suivante est satisfaite : $\forall v_n \in N_v$, avec N_v représentant le voisinage de v :

$$\sum_{v_j \in \mathcal{M}} GeodDist(v, v_j) \geq \sum_{v_j \in \mathcal{M}} GeodDist(v_n, v_j)$$

L'approche considère également les nœuds autour desquels la forme du maillage est construite et appelés "centres d'attention" (20% des nœuds les plus distincts du maillage sont considérés). Les régions proches de ces centres d'attention sont considérées comme davantage intéressantes par l'approche que celles situées plus loin. L'association d'un nœud v_i à son centre d'attention est défini par :

$$A(v_i) = D_{foci}(v_i) \exp \left\{ -\frac{GeodFoci^2(v_i)}{2\sigma^2} \right\}$$

où $GeodFoci(v_i)$ représente la distance géodésique entre v_i et le centre d'attention le plus proche, $D_{foci}(v_i)$ la valeur de distinction de ce centre d'attention et $\sigma = 0.5$.

Les nœuds situés à l'extrémité du maillage sont également considérés comme des centres d'attention. Ainsi pour chaque nœud du maillage, sa distance géodésique à une extrémité représentant son degré d'extrémité est calculée par :

$$E(v_i) = \exp \left\{ -\frac{\text{GeodExt}^2(v_i)}{2\sigma^2} \right\}$$

Finalement le degré d'intérêt d'un nœud sur le maillage est défini par le maximum entre sa distinction et son degré d'extrémité :

$$I(v_i) = \max \left(\frac{D(v_i) + A(v_i)}{2}, E(v_i) \right)$$

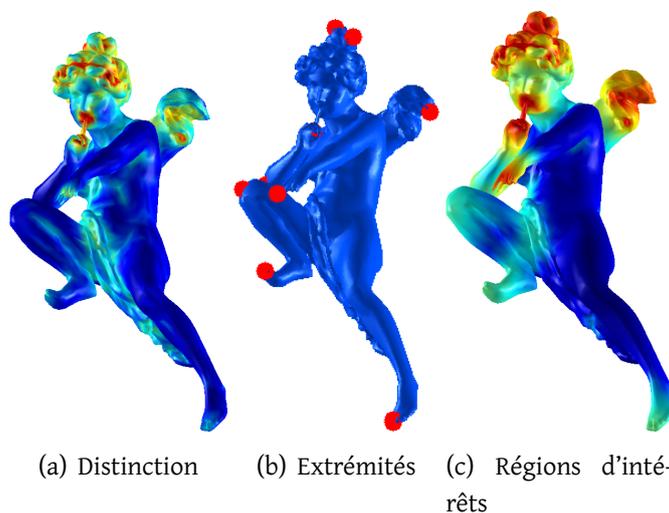


FIGURE 1.6: Synopsis de l'approche de Tal *et al.* [Tal *et al.*, 2012]

La figure 1.6 résume les principales étapes de l'approche de Tal *et al.*

Modèle de Song *et al.*

Song *et al.* [Song *et al.*, 2014] suggèrent d'estimer la saillance dans le domaine spectral en analysant les irrégularités du spectre du Log-Laplacien. Les auteurs avancent que le spectre du Log-Laplacien géométrique d'un maillage 3D possède des attributs exploitables pour l'estimation de la saillance.

Pour un maillage 3D \mathcal{M} contenant m nœuds $\{p_1, \dots, p_m\}$, l'approche commence par calculer une version simplifiée du maillage $\hat{\mathcal{M}}$ en utilisant l'algorithme QSlim [Garland and Heckbert, 1997]. Ensuite un groupe de maillages lissés $\hat{\mathcal{M}}(t_s)$ est généré en appliquant des filtres gaussiens de différents paramètres t_s , $s = 1, 2, \dots, 5$:

$$D(p, t_s) = F(p, kt_s) - F(p, t_s)$$

où k est un facteur multiplicatif constant, $p \in \mathcal{M}(t_s)$ et F une représentation linéaire de l'espace échelle définie par la convolution :

$$F(\cdot, t_s) = U(\cdot) \otimes g(\cdot, t_s)$$

où U est un signal de dimension d et g un noyau gaussien avec un écart type $\sigma = \sqrt{t_s}$ défini par :

$$g(p, t_s) = \frac{1}{(2\pi t_s)^{1/2}} \exp(-p^T p / (2t_s))$$

Le voisinage du nœud p autour duquel le filtre gaussien est appliqué comprend tous les nœuds situés à une distance égale à $2.5\sqrt{t_s}$.

Un deuxième groupe de maillages lissés $\hat{\mathcal{M}}(k(i)t_s)$ est généré en utilisant un espace d'échelle dynamique :

$$D(p_i, t) = |F(p_i, k(i)t) - F(p_i, t)|$$

où le paramètre k dépend cette-fois-ci de la densité locale des nœuds sur la surface du maillage :

$$k(i) = \frac{cn}{\sum_{j \in N(i)} \|p_i - p_j\|} + 1$$

où n représente le nombre de nœuds adjacents au nœud i , et c est une constante de normalisation égale à la moyenne des distances entre les nœuds du maillage.

Similairement à l'approche de [Lee et al., 2005] pour la détection de la saillance multi-échelle, 5 échelles sont fixées $t \in \{e^2, 2e^2, 3e^2, 4e^2, 5e^2\}$ où e est égal à 0.2% de la longueur de la diagonale de la boîte englobante du maillage 3D.

Une fois les bancs de maillages construits, le calcul de la saillance pour une échelle s'effectuera en plusieurs étapes. L'approche commence par calculer le Laplacien L pour un maillage de $\hat{\mathcal{M}}(t_s)$ de la manière suivante :

$$L = A - D$$

où A représente la matrice d'adjacence entre les nœuds :

$$A(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } p_i \text{ et } p_j \text{ sont des voisins directs,} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

et D est une matrice diagonale dans laquelle D_{ii} est égale au degré du nœud p_i . Afin de prendre en compte l'information géométrique locale, la matrice d'adjacence est pondérée par la distance entre les nœuds voisins :

$$W(i, j) = \frac{1}{\|p_i - p_j\|^2} A(i, j)$$

Le Laplacien géométrique est alors défini par :

$$L = W - D$$

et son spectre par :

$$H(f) = \{\lambda_f, 1 \leq f \leq m\}$$

où λ_f représentent les valeurs propres (fréquences) du Laplacien géométrique ordonnées de manière croissante (f sont les indices des fréquences), et m le nombre de nœuds du maillage.

Il a été observé que les spectres du Laplacien de maillages 3D semblables partagent une redondance strictement similaire [Hou and Zhang, 2007] et que la détection des informations atypiques dans le spectre représente la saillance. Afin d'amplifier les variations locales ainsi que les déviations globales au niveau des petites fréquences et supprimer celles situées sur le reste du spectre, une transformation logarithmique est appliquée au spectre :

$$\iota(f) = \log(|H(f)|)$$

Une fois la transformation appliquée, l'objectif est de détecter les fréquences peu communes dans le spectre. Song *et al.* proposent de moyenner localement le spectre, le lisser, et de chercher les fréquences significativement différentes de la moyenne locale. Un filtre moyennneur local $J_n(f)$ est utilisé :

$$A(f) = J_n(f) * \iota(f)$$

où $J_n(f) = \frac{1}{n}[1 \ 1 \ \dots \ 1]$ est un vecteur de taille $n \times 1$. La déviation spectrale est définie par l'irrégularité R :

$$R(f) = |\iota(f) - A(f)|$$

La transformation de l'irrégularité spectrale dans le domaine spatial est définie par :

$$S = BRB^T W$$

où $R = \text{Diag} \{ \exp(R(f)) : 1 \leq f \leq m \}$ est une matrice diagonale dont les entrées sont les exponentiels des éléments de $R(f)$.

Chaque ligne de la matrice S correspond à un nœud du maillage, par conséquent la saillance d'un nœud $S(i)$ est définie par la somme des valeurs de S le long de chaque

ligne.

Ce processus de calcul de la saillance sera utilisé pour calculer une carte de saillance $\tilde{S}(i, t)$ sur chaque échelle t en calculant la saillance des échelles $k(i)t$ et t :

$$\tilde{S}(i, t) = |S(i, k(i)t) - S(i, t)|$$

La carte de saillance multi-échelle du maillage simplifié est obtenue en sommant toutes les cartes de saillance associées aux différentes échelles. Un mapping de la saillance est effectué en direction du maillage original en utilisant un *K-d-tree*. La carte de saillance finale est finalement lissée pour faire face aux problèmes de discrétisation que peut engendrer la simplification.

1.3.1.3 Discussion

A partir de ce qui a été décrit ci dessus, nous pouvons remarquer qu'une étape de simplification est intégrée dans le processus de quelques modèles de saillance des maillages 3D non colorés. Malgré la rapidité d'exécution qu'amène cette simplification, cette dernière supprime inévitablement des nœuds de la géométrie du maillage qui pourraient avoir un degré important de saillance et par conséquent altère la surface et les fluctuations initiales. Il en résulte alors une mesure de la saillance qui ne tient pas compte de toutes les irrégularités locales et variations exiguës, pourtant nécessaires à l'estimation précise de la saillance sur la surface du maillage. D'autres étapes comme le lissage et la segmentation de la surface en patches similaires mènent vers une mesure de saillance dont la complexité est très importante.

Nous pouvons également distinguer à partir de l'état de l'art dressé qu'une seule et unique méthode valide ses résultats de détection de la saillance en la comparant qualitativement à une pseudo vérité terrain et avec les résultats de l'état de l'art. D'autres approches analysent les résultats obtenus soit indépendamment de toute comparaison avec l'état de l'art, soit au mieux, avec quelques résultats obtenus dans la littérature.

1.4 Saillance visuelle des maillages 3D non colorés par patches locaux adaptatifs

1.4.1 Motivation

A partir de l'analyse effectuée sur les méthodes de l'état de l'art, nous proposons un nouveau modèle de saillance indépendant de tout pré-traitement ou de post-traitement comme le remaillage, la simplification, le lissage ou la segmentation. Cette faculté permet d'une part de disposer d'une méthode fournissant précisément le degré de saillance

initial d'un nœud du maillage, et d'autre part de s'affranchir de traitements menant à une complexité importante du modèle.

Plusieurs études ont montré que la saillance visuelle est associée au fort contraste [Wolf, 1994] et aux fortes discontinuités [Coren et al., 2003]. Par exemple, une surface plane serait moins attirante qu'une surface contenant une forte fluctuation unique. D'autres études ont conclu que le système visuel est moins sensible aux motifs répétitifs et qu'il a tendance à en supprimer [Koch and Poggio, 1999]. La figure 1.7 représente ces deux aspects dans le contexte des maillages 3D. La figure 1.7(a) et la figure 1.7(b) présentent respectivement une surface presque plane et une surface avec une forte discontinuité. Notre regard serait davantage attiré par la surface présentant une forte discontinuité que par la surface plane. D'autre part, la figure 1.7(c) montre la patte d'un maillage 3D représentant un dinosaure. La surface de cette patte est constituée de motifs très redondants. Dans ce cas, notre regard sera plutôt attiré par les zones ne présentant pas cette redondance.

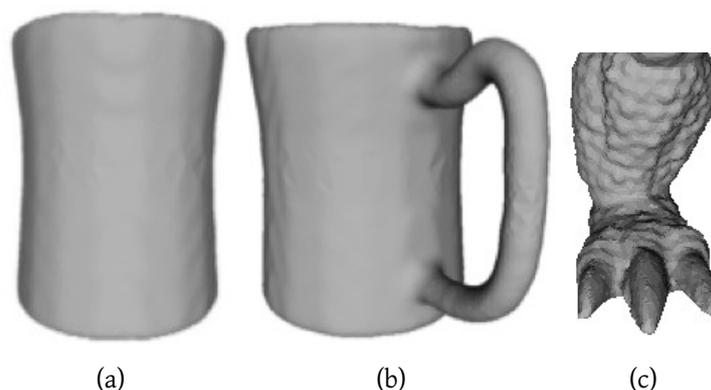


FIGURE 1.7: Sensibilité du système visuel humain au fort contraste et aux motifs peu répétitifs : a) Surface presque plane, b) surface contenant une forte discontinuité et c) motifs répétitifs.

Nous proposons un modèle de saillance intégrant ces particularités du SVH en considérant qu'un nœud du maillage est saillant s'il ressort fortement de son voisinage et si sa configuration géométrique locale est différente de celle de ses voisins adjacents. La figure 1.8 présente un synopsis de l'approche proposée.

1.4.2 Concepts et notations sur graphes

Dans l'intégralité de ce manuscrit, nous représentons un maillage \mathcal{M} par un graphe non-orienté $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, w)$ où $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_N\}$ est un ensemble de N nœuds, $\mathcal{E} \subset \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ est l'ensemble des arêtes déduit à partir des faces triangulaires connectant les nœuds du maillage et $w : \mathcal{E} \rightarrow \mathbb{R}$ représente une fonction symétrique positive de pondération. Nous nous limitons aux graphes non-dirigés (*i.e.*, pour tout $x, y \in \mathcal{V}$, $(x, y) \in \mathcal{E}$)

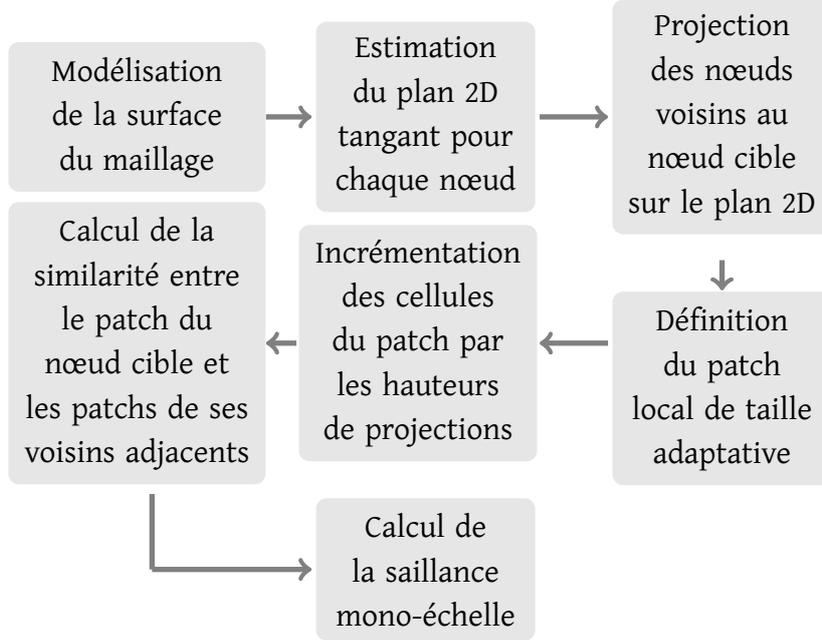


FIGURE 1.8: Synopsis du calcul de la saillance mono-échelle.

si et seulement si $(y, x) \in \mathcal{E}$. Pour chaque nœud du maillage, des coordonnées 3D $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i)^T \in \mathbb{R}^3$ lui sont associées. La notation $v_i \sim v_j$ est utilisée pour faire référence à deux nœuds adjacents dans \mathcal{G} (i.e., $(v_i, v_j) \in \mathcal{E}$).

1.4.3 Modélisation de la surface d'un maillage 3D

La modélisation de la surface du maillage 3D est nécessaire pour définir les descripteurs locaux. Pour chaque nœud v_i sur la surface du maillage, nous calculons son vecteur représentant la normale $z(v_i)$ et ses vecteurs directionnels $x(v_i)$ et $y(v_i)$ servant à estimer le plan tangent au nœud v_i sur la surface du maillage.

Nous commençons par définir une sphère S_ε de rayon r centrée en v_i . Les nœuds appartenant à cette sphère seront considérés comme voisins de v_i afin d'estimer son centre de gravité $\hat{\mathbf{v}}_i$ défini par :

$$\hat{\mathbf{v}}_i = \frac{1}{|S_\varepsilon(v_i)|} \sum_{j \in S_\varepsilon(v_i)} \mathbf{v}_j \quad (1.1)$$

ainsi que la matrice de covariance associée en \mathbf{v}_i définie par :

$$\text{cov}(v_i) = \sum_{j \in S_\varepsilon(v_i)} (\mathbf{v}_j - \hat{\mathbf{v}}_i)(\mathbf{v}_j - \hat{\mathbf{v}}_i)^T \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad (1.2)$$

où $|S_\varepsilon(v_i)|$ représente la cardinalité du voisinage sphérique S_ε . Nous utilisons les vecteurs propres de la matrice de covariance pour déterminer à la fois le vecteur repré-

sentant la normale $\mathbf{z}(v_i)$ et les deux vecteurs directionnels suivant les axes x et y . Une approche similaire pourra être trouvée dans [Digne et al., 2012].

Ainsi, la surface du maillage sera représentée par des nœuds avec leurs normales respectives. Cependant celles-ci auront des directions différentes (vers l'extérieur ou vers l'intérieur du maillage). Afin de rendre l'orientation des normales uniforme sur tout le maillage, nous propageons l'orientation d'une normale, choisie arbitrairement, aux normales des points voisins. Pour cela, nous commençons par affecter aux arêtes entre deux nœuds voisins v_i et v_j le poids $w(v_i, v_j)$ défini par :

$$w(v_i, v_j) = 1 - |\eta_i^T \eta_j|, \quad v_j \sim v_i \quad (1.3)$$

où η_j et η_k représentent les normales associées respectivement aux nœuds v_i et v_j . Ensuite un arbre de poids minimal (Minimum Spanning Tree) est généré pour le maillage et parcouru en profondeur pour rendre l'orientation uniforme [Hoppe et al., 1992].

1.4.4 Construction des descripteurs locaux : les patches locaux adaptatifs

Une fois le maillage modélisé par la procédure décrite précédemment, nous proposons de construire des patches adaptatifs. Ceci peut être considéré comme une extension des travaux de [Maximo et al., 2011] [Digne et al., 2012] avec une adaptativité de la taille du patch. Pour ce faire, dans un premier temps les nœuds contenus dans une sphère centrée en v_i avec un rayon ε $S_\varepsilon(v_i) = \{v_j \mid \|\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i\|_2 \leq \varepsilon\}$ sont projetés sur le plan 2D $\mathbf{P}(v_i)$ défini par les vecteurs directeurs associés. Nous obtenons ainsi les vecteurs 2D \mathbf{v}'_j tels que :

$$\mathbf{v}'_j = [(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{x}(v_i), (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{y}(v_i)]^T \quad (1.4)$$

Reste à définir la taille du patch. Nous proposons une configuration dynamique en fonction de la distance entre les coordonnées 2D des nœuds projetés \mathbf{v}'_j issus de la sphère $S_\varepsilon(v_i)$. Il est alors possible de définir les dimensions du patch selon l'axe des abscisses et des ordonnées (respectivement notées $T_x(\cdot)$ et $T_y(\cdot)$) par :

$$T_d(v_i) = \max_{(\mathbf{v}'_j, \mathbf{v}'_k) \in \mathbf{P}(v_i)} (\|\mathbf{v}'_j{}^d - \mathbf{v}'_k{}^d\|_2^2) \quad (1.5)$$

où d représente la coordonnée x ou y , $\mathbf{v}'_j{}^d$ la coordonnée d du vecteur \mathbf{v}'_j , et $\|\cdot\|_2$ la norme euclidienne.

Ainsi, le patch en v_i est représenté par un rectangle de taille $T_x(v_i) \times T_y(v_i)$ centré en v_i (nous noterons qu'habituellement un patch est représenté par un carré de taille fixe [Maximo et al., 2011][Digne et al., 2012] ne permettant pas de disposer d'un descripteur

local dépendant de la configuration géométrique locale). Le patch construit est ensuite divisé en un nombre de cellules $l \times l$ permettant de préciser l'indice de la cellule dans laquelle un nœud voisin sera projeté tel que :

$$\text{indice}^d = \left\lfloor \frac{\mathbf{v}'_j}{T_d(v_i)/l} \right\rfloor \quad \text{avec } v_j \sim v_i \quad (1.6)$$

où $\lfloor \cdot \rfloor$ indique l'opérateur arrondissant un entier à sa valeur inférieure la plus proche.

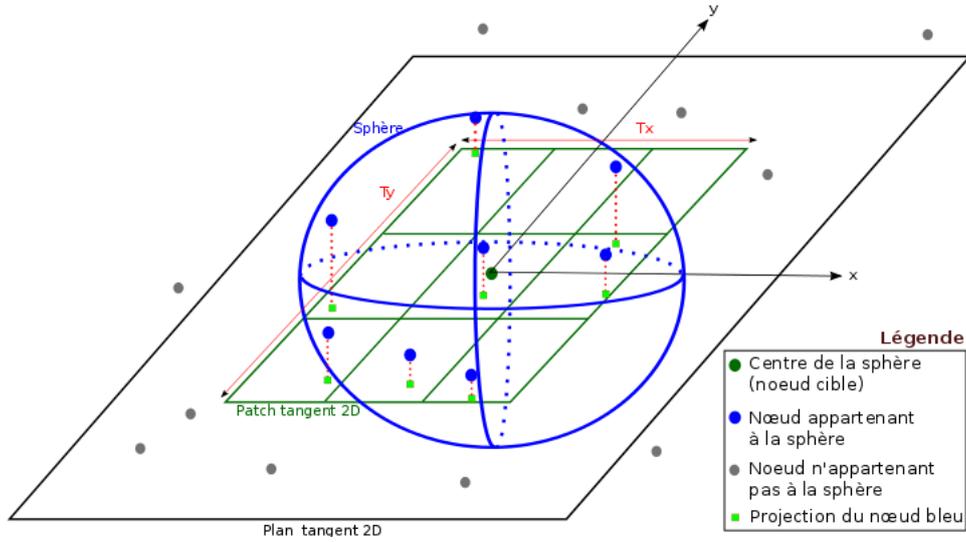


FIGURE 1.9: Patch local adaptatif : les points bleus représentent les nœuds situés dans la sphère S_ϵ où le centre est représenté par un nœud cible en vert foncé. Les nœuds en gris n'appartiennent pas à la sphère S_ϵ . Ainsi seuls les nœuds en bleu sont projetés sur le plan 2D. Les projections sous forme de carrés verts représentent les vecteurs 2D projetés.

Finalement chaque cellule du patch \mathcal{P}_i^k ($k \in [1, l \times l]$) est remplie avec la somme des valeurs absolues des hauteurs de projection

$$\mathbf{H}(v_i) = \left(\sum_{\mathbf{v}'_j \in D_i^k} \|(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}'_j)\|_2^2, \forall k \right)^T \quad (1.7)$$

où $\mathbf{H}(v_i) \in \mathbb{R}^{l \times l}$ représente le vecteur des hauteurs cumulées dans les cellules du patch.

La figure 1.9 illustre le processus de la construction des patches locaux adaptatifs et la figure 1.10 présente les patches associés à trois nœuds appartenant à des régions différentes du maillage : une région saillante (doigt du maillage 3D Gorille), une région moyennement saillante (située entre l'épaule et le cou du Gorille) et une région non saillante (la région plane située au niveau du tibia du Gorille). Les pixels rouges sur l'immagine représentant le patch construit font référence aux importantes hauteurs de pro-

jection relatives aux voisins du nœud cible. Nous remarquons bien l'adaptativité de la taille du patch pour chacun de ces exemples.

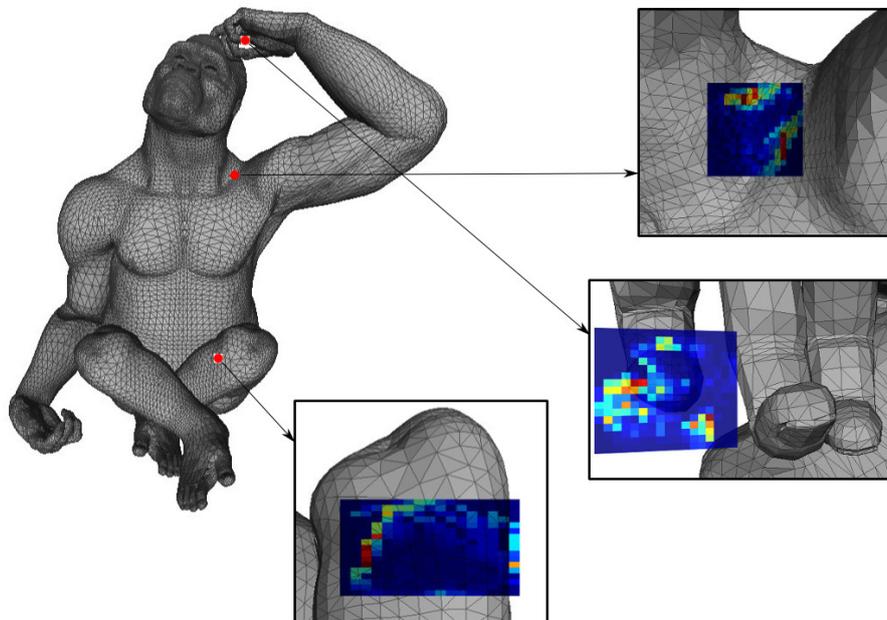


FIGURE 1.10: Patches construits associés à 3 nœuds (points rouges) appartenant à différentes régions sur la surface du maillage 3D : une région saillante (doigt du maillage 3D Gorille), une région moyennement saillante (située entre l'épaule et le cou du Gorille) et une région non saillante (la région plane située au niveau du tibia du Gorille).

Il est important de noter que l'adaptativité de la taille des patches n'est pas liée au rayon ε de la sphère, mais plutôt à la distance maximale entre les projections 2D des nœuds le long des axes x et y . Ceci renforce son aspect adaptatif. Cette méthode de construction de patches fonctionne également pour des nuages de points 3D au lieu de maillages 3D puisque la topologie du maillage n'est pas prise en compte.

1.4.5 Saillance mono-échelle

Pour calculer la saillance mono-échelle d'un nœud, nous définissons une mesure de similarité entre son patch et les patches associés à ses voisins adjacents. Nous proposons également de calculer localement un paramètre d'échelle (écart-type du noyau gaussien mesurant la dissimilarité). En effet, utiliser un paramètre d'échelle spécifique pour chaque nœud nous permet de prendre en considération la distribution locale autour de celui-ci.

Le paramètre d'échelle $\sigma(v_i)$ est déterminé par :

$$\sigma(v_i) = \max_{v_k \sim v_i} (\|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_k\|_2) \quad (1.8)$$

Il est à noter que nous avons testé un paramètre d'échelle basé sur la norme euclidienne entre les patches, toutefois la norme euclidienne entre les coordonnées 3D des nœuds a conduit vers de meilleurs résultats.

Ainsi, la similarité affectée au poids de l'arête $e(v_i, v_j)$ est définie par :

$$w(v_i, v_j) = \exp \left[-\frac{\kappa(v_j) * \|\mathbf{H}(v_i) - \mathbf{H}(v_j)\|_2^2}{\sigma(v_i) * \sigma(v_j) * \|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j\|_2^2} \right] \text{ avec } v_j \sim v_i \quad (1.9)$$

où $\kappa(v_j)$ est la courbure du nœud v_j calculée avec la méthode de [Rusinkiewicz, 2004] et $\|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j\|_2^2$ représente la distance euclidienne entre les nœuds v_i et v_j . Dans le cas où la distance euclidienne entre deux patches locaux adaptatifs $\mathbf{H}(v_i)$ et $\mathbf{H}(v_j)$ est importante, la similarité entre leurs nœuds associés v_i et v_j sera proche de 0 (*i.e.*, ils sont dissimilaires).

Finalement la saillance visuelle d'un nœud v_i du maillage 3D est définie par son degré moyen :

$$\text{saillance-mono-échelle}(v_i) = \left(\frac{1}{|v_j \sim v_i|} \right) \sum_{v_j \sim v_i} w(v_i, v_j) \quad (1.10)$$

où $|v_j \sim v_i|$ représente la cardinalité du voisinage contenant les nœuds adjacents et $w(v_i, v_j)$ le poids de l'arête $e(v_i, v_j)$. Cette saillance mono-échelle d'un nœud est définie dans $[0, 1]$ où 0 fait référence à un haut degré de saillance (très dissimilaire de son voisinage) et 1 à un degré très faible de saillance (très similaire à son voisinage).

1.4.6 La contribution de la courbure et du coefficient de poids de distance dans le calcul de la saillance mono-échelle

La figure 1.11 présente la saillance mono-échelle calculée sur le maillage Gorille avec notre méthode. Nous pouvons remarquer que notre approche fait ressortir finement les régions associées aux pattes et aux orteils et les juge en tant que régions saillantes. Nous pouvons également remarquer que les détails exigus tels que les yeux, le nez, la bouche, et les oreilles sont bien détectés mais avec une certaine imperfection au niveau des yeux. Leur saillance est saturée. Ce comportement va être corrigé par la prise en compte de l'aspect multi-échelle (voir la figure 1.13).

Il est intéressant d'analyser ici l'apport des coefficients de pondération de courbure et de la distance euclidienne. La figure 1.12 présente une comparaison entre la saillance détectée en utilisant ces coefficients et la saillance détectée sans les utiliser. Il est facilement remarquable que la saillance estimée avec les coefficients de pondération de courbure et de distance est bien fine que celle détectée sans ces coefficients. Le surplus

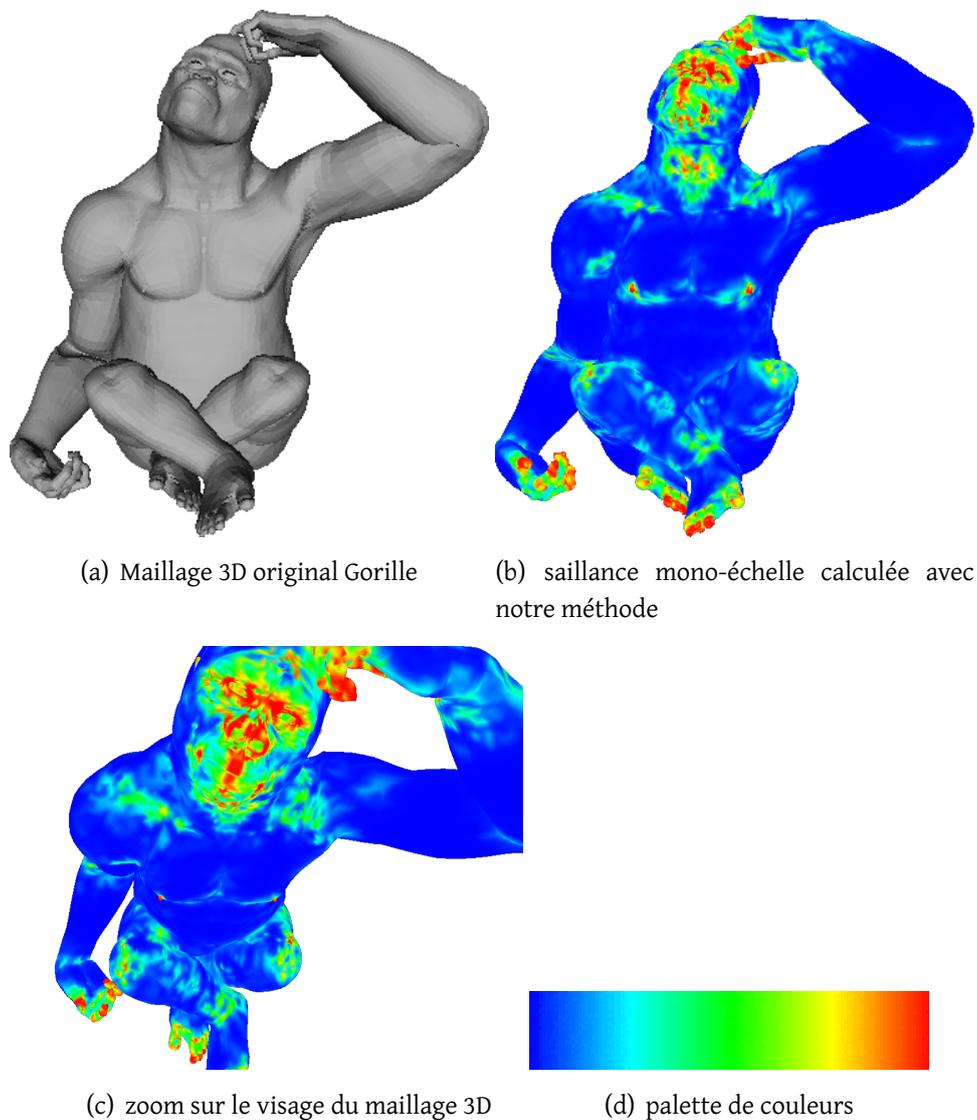


FIGURE 1.11: Saillance mono-échelle calculée avec notre approche. Les zones rouges sur la surfaces du maillage 3D font référence aux régions fortement saillantes. Celles en bleu ne sont pas saillantes.

de saillance au niveau des côtes, de la poitrine, des genoux, des avant-bras et des pattes a été corrigé. De plus, les régions saillantes associées au nez, aux yeux, à la bouche et aux orteils ont été préservées. En effet, utiliser la courbure d'un nœud (equation 1.9) permet d'estimer la discontinuité entre le nœud cible et ses voisins adjacents. Une forte discontinuité influera davantage le degré de saillance qu'une faible discontinuité. Par conséquent, ce paramètre a contribué à l'élimination du surplus de saillance.

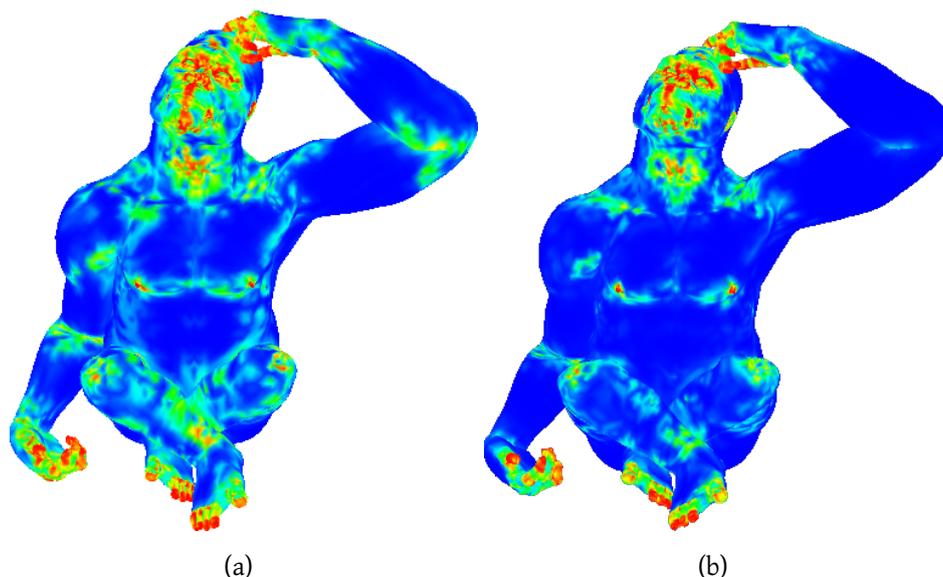


FIGURE 1.12: L'apport des coefficients de pondérations sur le rendu de la saillance : a) Saillance mono-échelle détectée sans les coefficients de pondérations de courbure et de distance et b) saillance mono-échelle détectée avec les coefficients de pondérations de courbure et de distance.

Le coefficient de distance dans le dénominateur de l'équation 1.9 réduit la contribution des nœuds situés à une distance importante du nœud cible dans le calcul des similarités entre patches, ce qui explique aussi la suppression de la surévaluation de la saillance.

1.4.7 L'influence du nombre de cellules des patches et du voisinage sphérique dans le calcul de la saillance

Deux paramètres affectent le rendu de la saillance : le nombre de cellules des patches l et le rayon de la sphère S_ϵ contenant les nœuds projetés. Le tableau 1.1 présente l'amplitude de la saillance détectée en fonction des deux paramètres l et ϵ . Nous pouvons remarquer que la saillance dépend fortement du voisinage délimité par la sphère S_ϵ et du nombre de cellules des patches adaptatifs. Sur ce tableau, un rayon égal à 1 permet une estimation très faible de la saillance. Remarquons aussi que dans ce cas, l'augmentation du nombre de cellules n'influe pas sur l'estimation de la saillance. A contrario, un rayon

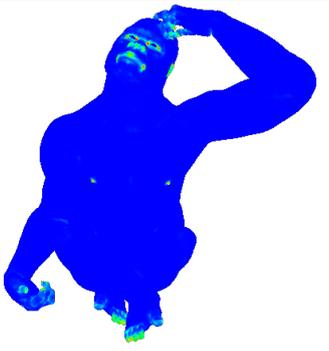
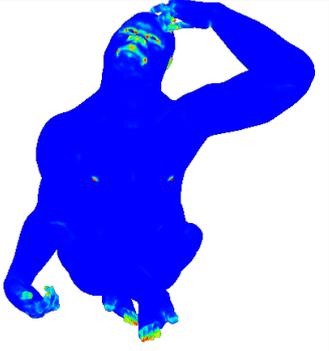
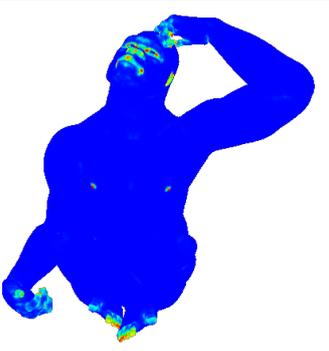
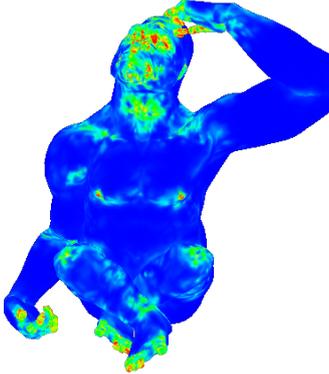
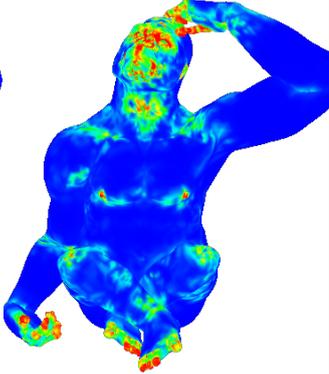
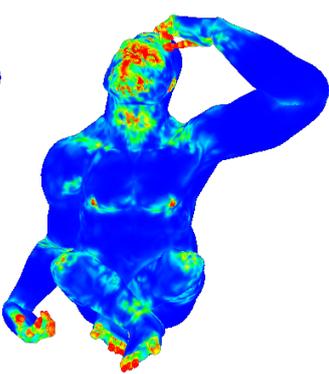
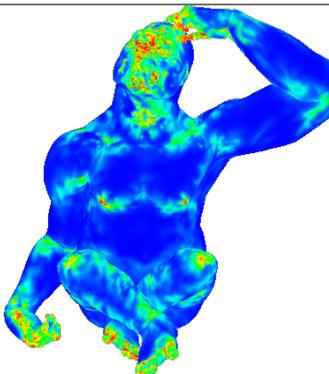
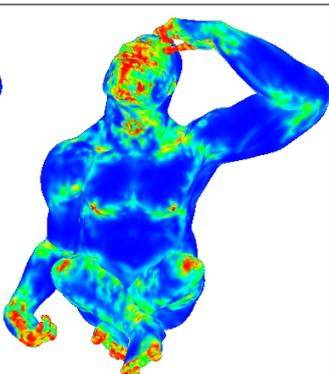
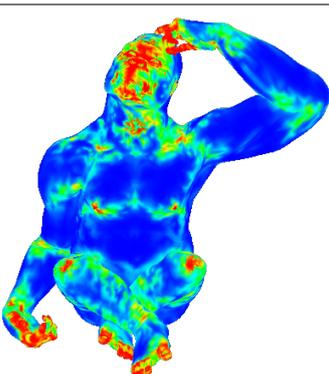
	Nombre de cellules l		
	7x7	17x17	27x27
$\varepsilon=1$			
$\varepsilon=2$			
$\varepsilon=3$			

TABLE 1.1: Influence des paramètres ε et l sur la détection de la saillance.

de sphère égal à trois permet d'élargir considérablement le voisinage, ce qui mène vers une sur-description de la surface du maillage, et donc à une prise en compte extrême des fluctuations sur la surface. Nous pouvons constater aussi que le nombre de points saillants augmente proportionnellement avec le nombre de cellules.

Ainsi le voisinage devrait être spécifié en fonction de l'application utilisant la saillance. Sur notre exemple, un rayon égal à 2 et un nombre de cellules égal à 17 conduit à une bonne estimation des régions saillantes. Les détails fins comme les yeux, le nez et la bouche sont pris en compte.

Enfin, ces trois voisinages sphériques permettront de mettre en oeuvre une mesure de saillance multi-échelle basée sur les patches locaux adaptatifs.

1.4.8 Calcul de la saillance multi-échelle

Afin d'améliorer la qualité de notre mesure de saillance, nous calculons celle-ci sur différentes échelles. Sur les échelles fines, la mesure de saillance détectera les détails acérés et fins, tandis que sur les grandes échelles, elle fera ressortir les larges zones saillantes (voir tableau 1.1). Un autre intérêt de l'aspect multi-échelle apparaît dans la robustesse de la méthode face au bruit en raison de sa perceptibilité sur quelques échelles uniquement. Pour cela, nous varions le rayon ε de la sphère S_ε lors de la construction des patches ce qui permet de considérer trois voisinages de tailles différentes. Trois cartes de saillances mono-échelles sont alors calculées et combinées en prenant en compte l'entropie de chacune d'elles. En effet, la mesure de l'entropie permet d'évaluer le désordre et la disparité de la saillance sur chacune des cartes. Pour une échelle k , nous calculons l'histogramme de saillance h_k afin d'obtenir la probabilité d'avoir la valeur de saillance i :

$$Pr_{i,k} = h_k^i / |\mathcal{V}| \quad (1.11)$$

où h_k^i représente le nombre de nœuds ayant la valeur de saillance i à l'échelle k . Ainsi, l'entropie à l'échelle k est définie par :

$$\text{entropie}_k = - \sum Pr_{i,k} * \log_2 Pr_{i,k} \quad (1.12)$$

En pondérant la saillance de chaque nœud lors de la combinaison des différentes échelles par leurs entropies associées, nous obtenons une carte de saillance multi-échelle robuste qui considère la disparité de la saillance sur différentes échelles. La saillance multi-échelle est définie par :

$$\text{Saillance-multi-échelle}(v_i) = \frac{\sum_{k=1}^3 \text{Saillance-mono-échelle}_k(v_i) * \text{entropie}_k}{\sum_{k=1}^3 \text{entropie}_k} \quad (1.13)$$

où k est l'indice de l'échelle.

La figure 1.13 présente la saillance multi-échelle détectée sur le maillage 3D Gorille (figure 1.13(a)). Nous pouvons remarquer sur la figure 1.13(b) que notre mesure de saillance

multi-échelle fait ressortir finement les régions saillantes sur la surface du maillage 3D. La figure 1.13(c) montre la saillance détectée sur le visage du Gorille. En comparant ce résultat multi-échelle avec le résultat de la saillance mono-échelle (figure 1.11), nous pouvons remarquer que la saturation de la saillance au niveau des yeux et du nez a été corrigée. Seuls les yeux du Gorille sont dorénavant jugés saillants et non plus leurs zones périphériques (figure 1.11). Ceci était espéré, puisque comme mentionné précédemment, notre méthode considère les nœuds proéminents (en relief) sur une surface plane comme des nœuds potentiellement saillants (les discontinuités sur les surfaces attirant naturellement l'attention de l'observateur humain).

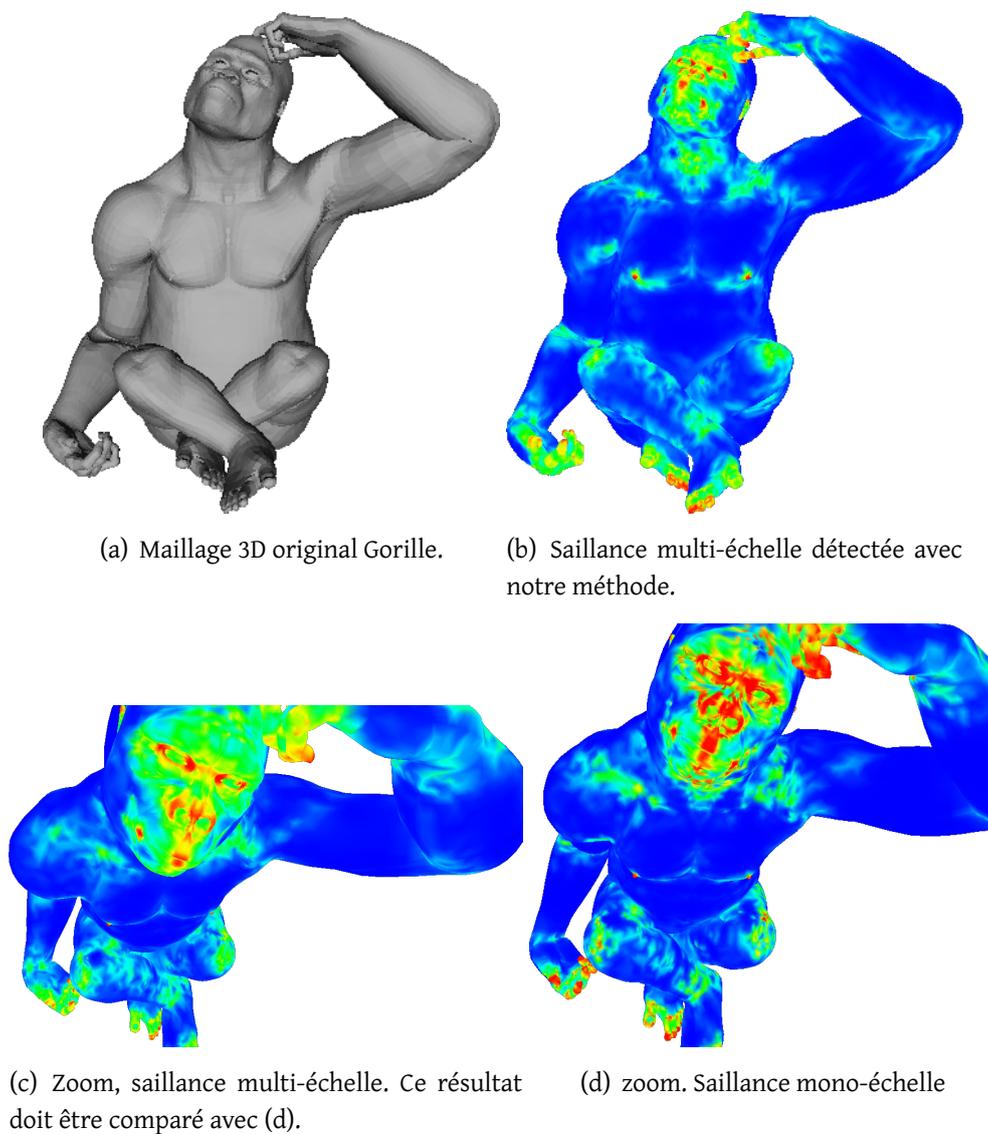


FIGURE 1.13: Saillance multi-échelle détectée avec notre approche.

1.4.9 Extension à la saillance des maillages 3D colorés

Des études récentes sur la contribution de la couleur dans l'attraction de l'attention visuelle ont montré que l'information colorimétrique modifie les caractéristiques du mouvement oculaire lors de la visualisation d'un contenu multimédia [Shahrbabaki, 2015]. Par conséquent, nous avons cherché à étendre notre modèle de saillance aux maillages 3D colorés dont la détection de la saillance n'a jamais été étudiée dans l'état de l'art. Ces derniers sont d'un intérêt particulier pour plusieurs applications comme les jeux vidéos, l'ingénierie civile, l'impression 3D, etc. Grace aux récents scanners 3D, il est dorénavant possible d'acquérir simultanément la géométrie et la couleur d'un objet ou d'une scène. Une couleur \mathbf{c}_i par nœud sous forme d'un vecteur RGB est fournie pour décrire l'apparence colorimétrique.

Dans les sections précédentes, nous avons considéré uniquement les coordonnées 3D \mathbf{p}_i des nœuds. Pour étendre notre mesure de saillance multi-échelle aux maillages 3D colorés, nous procédons de la manière suivante : Un patch est construit similairement aux maillages non-colorés, cependant ses cellules \mathcal{P}_i sont remplies avec la moyenne RGB des couleurs des nœuds projetés $\frac{1}{|\mathcal{P}_i|} \sum_{\mathbf{c}'_j \in \mathcal{P}_i} \mathbf{c}'_j$, définissant alors un vecteur-couleur $\mathcal{C}(v_i)$ représentant le patch local sur chaque nœud. Les arêtes sont pondérées par :

$$w_{\mathcal{C}}(v_i, v_j) = \exp \left[-\frac{\|\mathcal{C}(v_i) - \mathcal{C}(v_j)\|_2^2}{\sigma_{\mathcal{C}}(v_i) * \sigma_{\mathcal{C}}(v_j) * l^2} \right] \quad (1.14)$$

avec $\sigma_{\mathcal{C}}(v_i) = \max_{v_k \sim v_i} (\|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_k\|_2)$. Nous pouvons alors définir de la même manière que précédemment une mesure de saillance mono-échelle pour les maillages colorés à l'échelle k :

$$\text{Saillance-mono-échelle-colorimétrique}_k(v_i) = \frac{1}{|v_j \sim v_i|} \sum_{v_i \sim v_j} w_{\mathcal{C}}(v_i, v_j) \quad (1.15)$$

Ainsi la saillance multi-échelle colorimétrique est définie par :

$$\text{Saillance-multi-échelle-colorimétrique}(v_i) = \frac{\sum_{k=1}^3 \text{Saillance-mono-échelle-colorimétrique}_k(v_i) * \text{entropie}_k}{\sum_{k=1}^3 \text{entropie}_k} \quad (1.16)$$

Les résultats de saillance associés aux maillages colorés sont présentés dans la section 1.6.

1.5 Résultats et validation de la saillance visuelle détectée sur les maillages 3D non colorés

1.5.1 Comparaison avec une pseudo vérité terrain

Nous comparons sur la figure 1.14 et la figure 1.15 les résultats de saillance de notre approche avec ceux détectés subjectivement (par des observateurs humains) sur divers maillages 3D de la base 2007 SHREC Shape-based Retrieval Contest [Chen et al., 2012] constituant une pseudo vérité terrain relative à la saillance visuelle pour les maillages 3D non colorés. Ces résultats de détection subjective de la saillance ont été élaborés lors d'une expérimentation en ligne dans laquelle les auteurs demandaient à des observateurs humains de sélectionner les points 3D qui seraient susceptibles d'être sélectionnés par d'autres observateurs. A partir de ces informations, les auteurs proposent un modèle basé sur la régression pour localiser les nœuds saillants sur la surface d'un maillage 3D. La figure 1.14 et la figure 1.15 montrent que la saillance détectée sur les divers maillages 3D avec notre approche correspond bien aux zones ayant attiré l'attention visuelle des observateurs humains. Nous pouvons aussi constater à partir des dites figures que notre modèle de saillance est précis non seulement pour les maillages représentant des êtres vivants mais aussi pour les maillages représentant des objets. Les valeurs faibles des erreurs quadratiques moyennes (NMSE - Normalized Mean Square Error) confirment ces précisions.

Pour quelques maillages non "optimisés", nous remarquons que notre mesure de saillance ne fonctionne pas avec la même précision (figure 1.16). La surface d'un maillage non "optimisé" est constituée de triangles de superficies régulières et d'arêtes ayant la même longueur (figure 1.17). En effet, nous pouvons remarquer sur les figures 1.16(a) et 1.16(c) que toutes les régions du maillage (régions possédant beaucoup de détails et régions possédant moins ou pas de détails) ont un nombre de triangles similaire (par exemple la paume de la main et les surfaces entre les doigts). Or, sur la surface d'un maillage "optimisé" (figure 1.16(b) et figure 1.16(d)), lorsque certaines régions contiennent beaucoup de détails (par exemple le creux en haut du dos de l'oiseau), ces dernières requièrent un nombre plus important de triangles. Pour les régions comprenant pas ou peu de détails sur un maillage "optimisé" (par exemple le bas du dos de l'oiseau), celles-ci sollicitent moins de triangles. Ainsi, les triangles sur la surface d'un maillage "optimisé" auront des superficies différentes et de facto des arêtes de longueurs différentes. Lors du calcul de la similarité (equation 1.9), nous utilisons un coefficient de pondération de distance $\|v_i - v_j\|_2^2$. Ce coefficient permet de diminuer l'influence des nœuds voisins situés à une distance importante du nœud cible et vice versa. Pour les maillages non "optimisés", tous les voisins adjacents à un nœud cible contribuent à la saillance

avec le même degré puisque le coefficient de pondération de distance est constant. Ceci explique le surplus des points rouges dans la carte de saillance obtenue sur la figure 1.16.

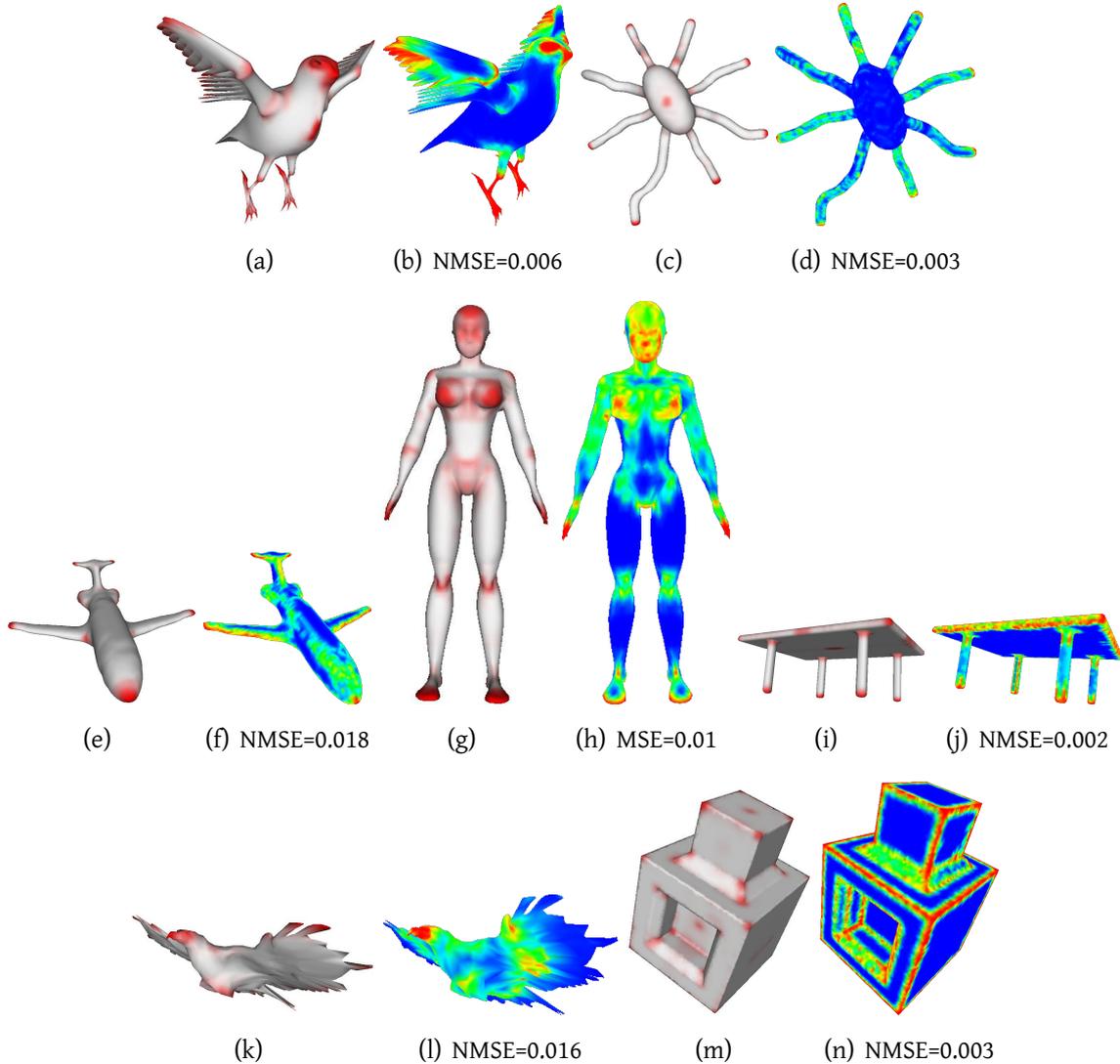


FIGURE 1.14: Comparaison de la saillance avec une pseudo vérité terrain : Les images (a),(c),(e),(g),(i),(k) et (m) présentent une pseudo vérité terrain de la saillance sur divers maillages 3D non colorés [Chen et al., 2012]. Les images (b),(d),(e),(h),(j),(l) et (n) montrent la saillance multi-échelle détectée avec notre approche.

1.5.2 Analyse et comparaison avec l'état de l'art

Comme les sources/codes associées aux différentes approches de l'état de l'art ne sont pas disponibles, nous avons décidé de détecter la saillance sur les mêmes maillages 3D utilisés par les différents auteurs pour comparer les résultats. Sur la figure 1.18, nous

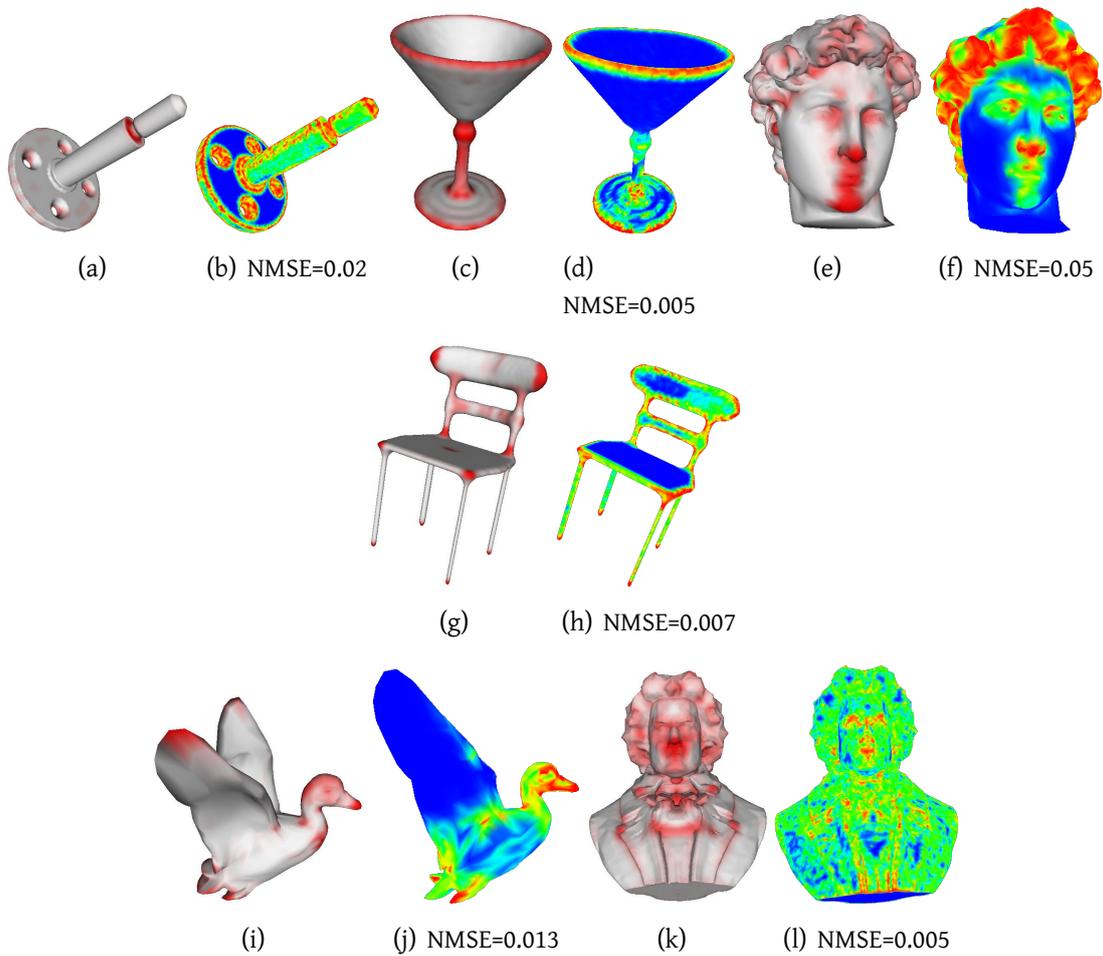


FIGURE 1.15: Comparaison de la saillance avec une pseudo vérité terrain : Les images (a),(c),(e),(g),(i), et (k) présentent une pseudo vérité terrain de la saillance sur divers maillages 3D non colorés [Chen et al., 2012]. Les images (b),(d),(e),(h),(j) et (l) montrent la saillance multi-échelle détectée avec notre approche.

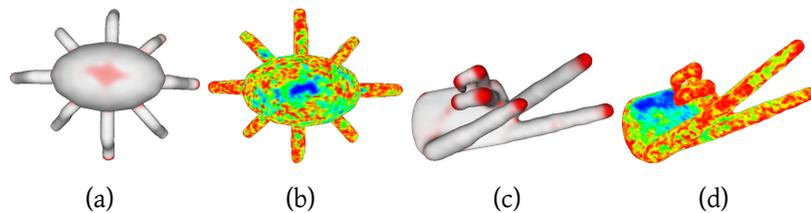


FIGURE 1.16: Détection imprécise de la saillance : a) - c) pseudo vérité terrain et b) - d) Saillance multi-échelle avec notre approche.

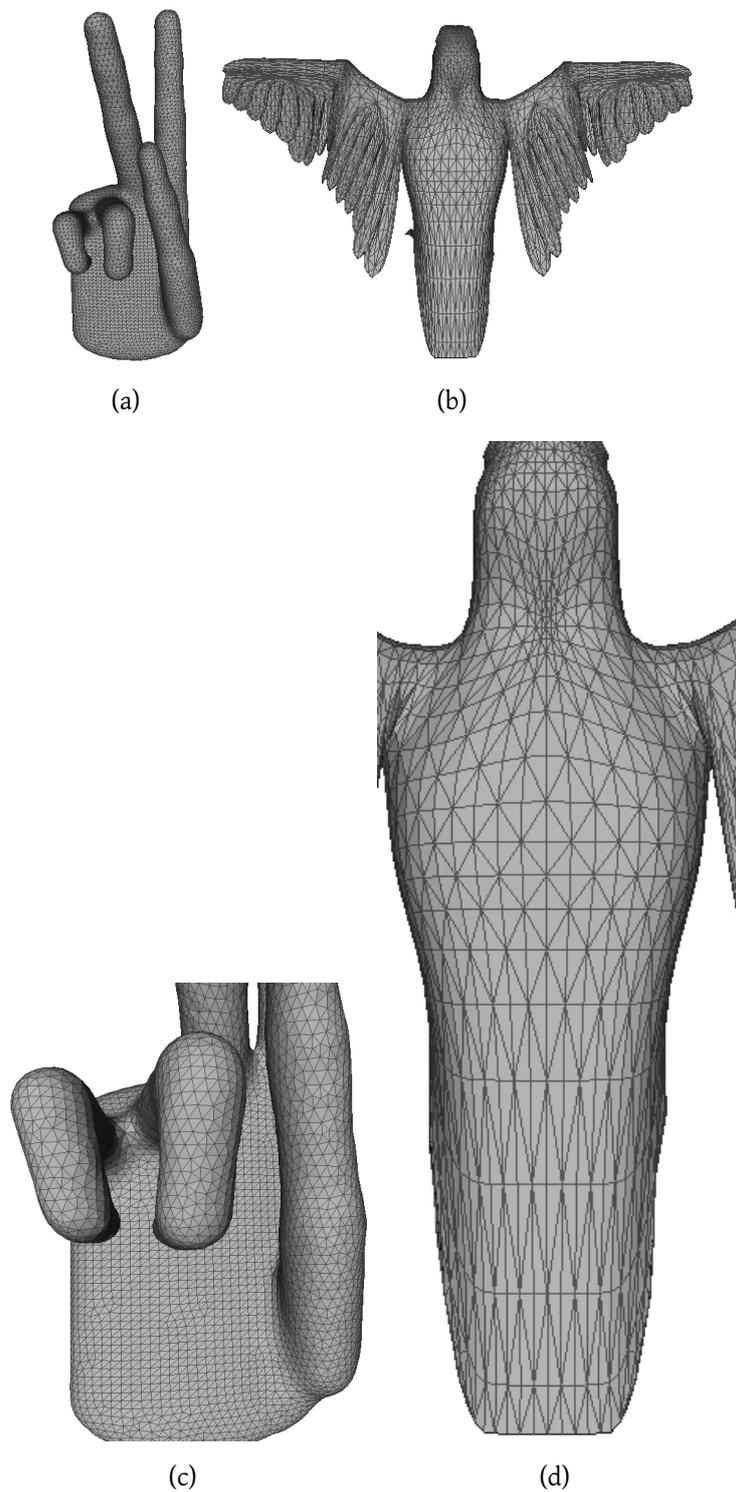


FIGURE 1.17: Maillages non "optimisés" et "optimisés" : a) maillage 3D "optimisé" (8946 nœuds), b) maillage 3D "optimisé" (8946 nœuds), c) zoom sur (a). Le nombre de triangles est constant sur toutes les régions du maillage et d) zoom sur (b). Le nombre de triangles varie en fonction de la quantité de détails que possède une région donnée.

considérons un maillage représentant un dinosaure sur lequel nous comparons notre mesure de saillance avec 3 méthodes de l'état de l'art [Tal et al., 2012] [Song et al., 2014] [Lee et al., 2005]. L'approche de Tal et al. [Tal et al., 2012] juge les côtes du dinosaure localisées sur le dos et le ventre non saillantes (figure 1.18(c)). Or, ces zones fluctuent extrêmement et comportent de fortes discontinuités. A contrario notre approche 1.18(b)) juge ces côtes très saillantes à cause de leurs fortes discontinuités. Notons aussi que notre approche ne considère pas le crâne du dinosaure entièrement saillant (excepté les yeux et les courbures) contrairement à l'approche de Tal et al. [Tal et al., 2012]. Cela signifie également qu'au premier regard en direction du maillage Dinosaure, l'attention visuelle sera placée sur une partie des côtes du dinosaure, plutôt que sur son crâne.

En ce qui concerne l'approche de Lee et al. [Lee et al., 2005], nous pouvons observer que la saillance est faiblement détectée (figure 1.18(e)) sur les zones à fortes fluctuations (colorées en vert foncé) et que les détails fins locaux ne sont pas pris en compte. Cependant, l'approche de Song et al. [Song et al., 2014] obtient une carte de saillance similaire à la nôtre dans la mesure où elle peut différencier les régions planes des régions à fortes discontinuités (1.18(d)). Nous noterons que tous les résultats de l'état de l'art sont très lisses et ne font pas ressortir les détails fins saillants contrairement aux nôtres.

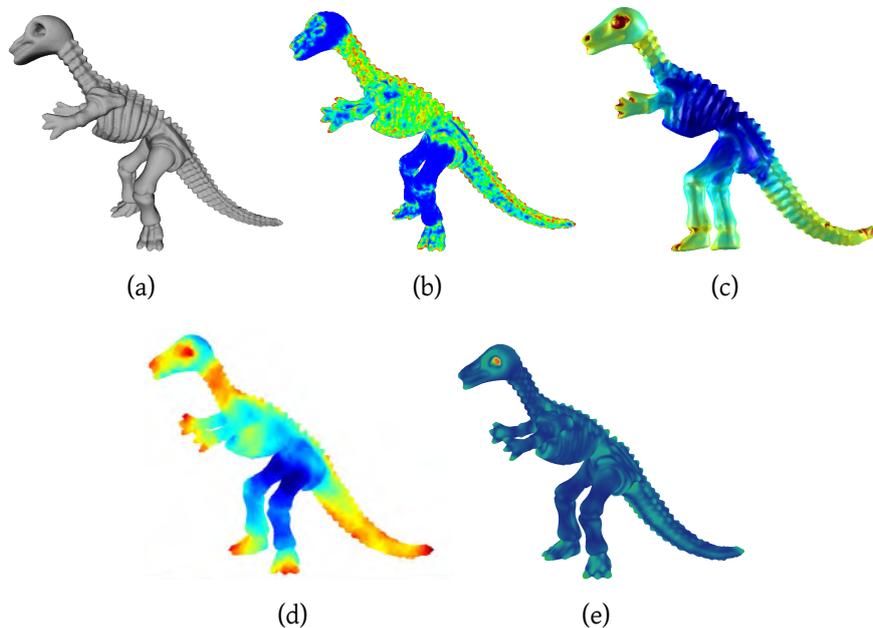


FIGURE 1.18: Comparaison avec l'état de l'art du maillage 3D Dinosaure : a) Maillage 3D Dinosaure original, b) saillance multi-échelle avec notre méthode, c) saillance avec la méthode de [Tal et al., 2012], d) saillance avec la méthode de [Song et al., 2014] et d) saillance avec la méthode de [Lee et al., 2005].

La figure 1.19 présente une comparaison de notre résultat de saillance relatif au maillage Ange avec les résultats des méthodes [Tal et al., 2012][Song et al., 2014][Lee

et al., 2005]. La surface du maillage 3D Ange est complexe dans la mesure où elle recèle plusieurs extrémités ainsi que des régions lisses et rugueuses à la fois. Alors que l'écharpe étendue sur la jambe de l'objet présentant des fluctuations est considérée comme saillante par la méthode de [Song et al., 2014] et la nôtre, l'approche de [Tal et al., 2012] l'a considérée comme très faiblement saillante. Les discontinuités au niveau des yeux, des bras, de la hanche, et du ventre sont également représentées comme saillantes par l'approche de [Song et al., 2014] et la nôtre, contrairement à la méthode de [Tal et al., 2012].

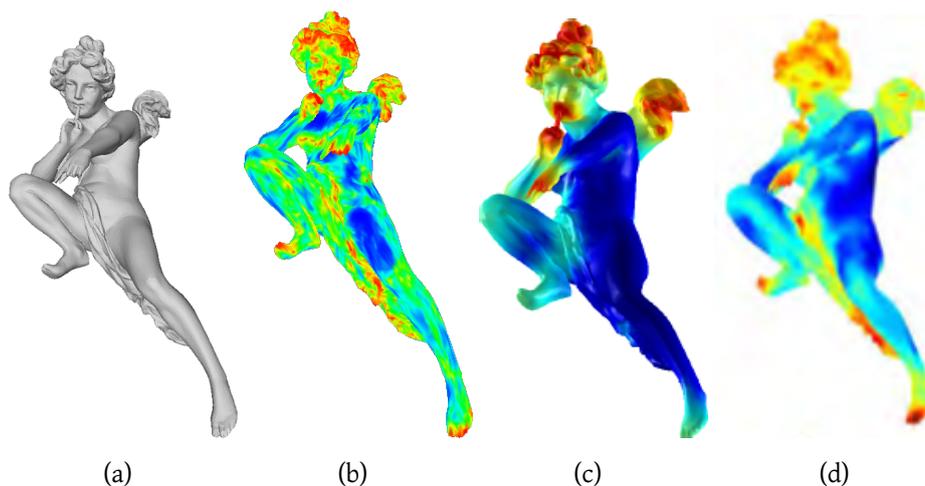


FIGURE 1.19: Comparaison de la saillance du maillage 3D Ange : a) Maillage 3D Ange original, b) saillance multi-échelle estimée avec notre approche, c) saillance avec la méthode de [Tal et al., 2012] et d) saillance avec la méthode de [Song et al., 2014].

La figure 1.20 compare les régions saillantes estimées sur le maillage 3D cheval avec notre approche et celles estimées par les approches de [Tal et al., 2012] et [Song et al., 2014]. Nous pouvons remarquer que notre méthode et celle de [Song et al., 2014] parviennent à considérer les yeux, parties fortement considérées sur les objets ou dans les scènes contenant les visages [Henderson et al., 2005], comme des régions saillantes alors que l'approche [Tal et al., 2012] échoue dans cette considération. Le dos du cheval possède des parties musclées. Ces zones sont également jugées saillantes par notre approche et celle de [Song et al., 2014] contrairement à l'approche de [Tal et al., 2012].

La figure 1.21 montre les résultats de notre mesure de saillance sur d'autres maillages 3D. Nous pouvons observer le même comportement de notre méthode, à savoir, une estimation fine de la saillance.

1.5.3 Robustesse et stabilité

Pour attester de la robustesse de notre approche, nous avons bruité les positions des nœuds du maillage 3D Centaure suivant deux degrés de bruit aléatoire et appliqué en-

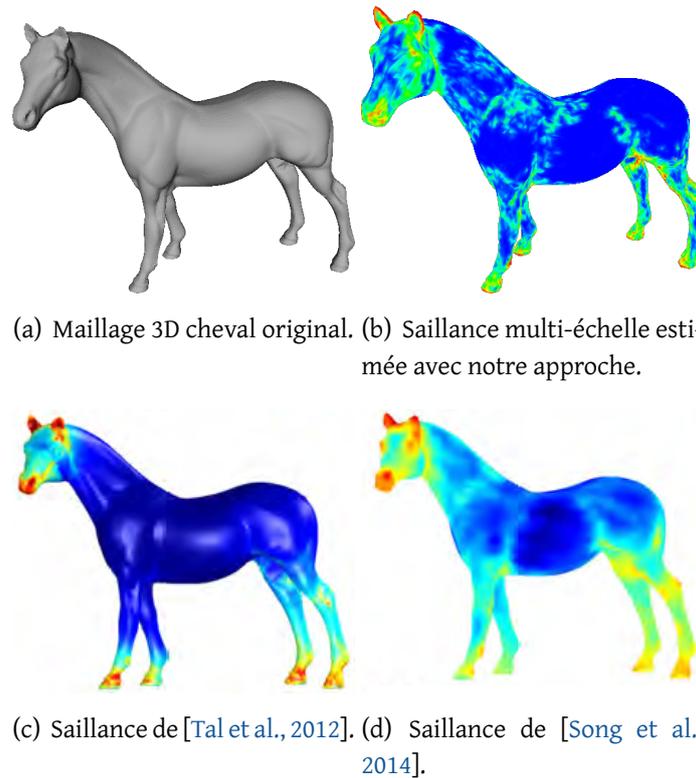


FIGURE 1.20: Comparaison de la saillance du maillage 3D Cheval avec l'état de l'art.

suite notre méthode de mesure de saillance. La figure 1.22 présente les résultats obtenus. Nous pouvons constater que notre approche parvient toujours à détecter les mêmes régions saillantes malgré un maillage sévèrement bruité. Les zones telles que les yeux, le nez, la bouche, la poitrine et le ventre sont toujours considérées saillantes. L'erreur quadratique moyenne normalisée a été calculée entre les valeurs de saillance associées au maillage original et celles du maillage bruité. La valeur faible du NMSE montre que notre approche est robuste au bruit.

Une autre expérimentation démontrant la stabilité de notre approche s'inscrit dans la détection de la saillance sur les maillages simplifiés. La simplification a été opérée en utilisant l'algorithme de Garland et Heckbert [Garland and Heckbert, 1997]. La figure 1.23 montre les résultats obtenus.

Sur la figure 1.23(a), le maillage est simplifié de 25% (suppression de 25% des nœuds) et nous pouvons constater que les régions initialement saillantes (figure 1.21(b)) sont toujours détectées (figure 1.23(c)). Sur la figure 1.23(b), le maillage est simplifié de 50%. Les mêmes régions sont toujours mises en exergue mais cette fois en moindre intensité (figure 1.23(d)). Cela est dû à la forte simplification du maillage qui tend à supprimer les discontinuités et par conséquent aplatit les nœuds. Les surfaces planes sans fluctuations ou discontinuités présentent naturellement une faible saillance visuelle.

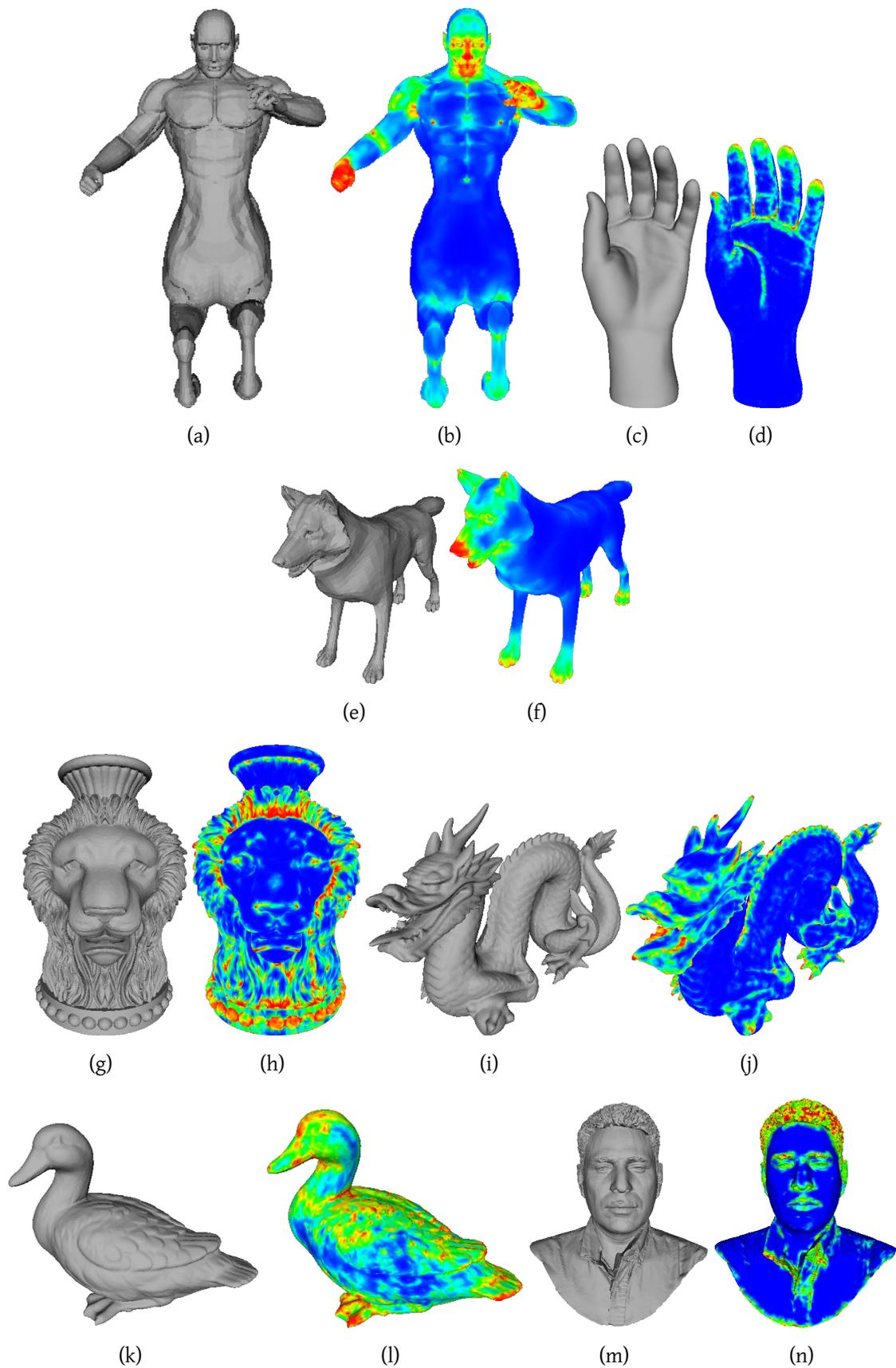


FIGURE 1.21: La saillance multi-échelle détectée sur d'autres maillages 3D avec notre approche.

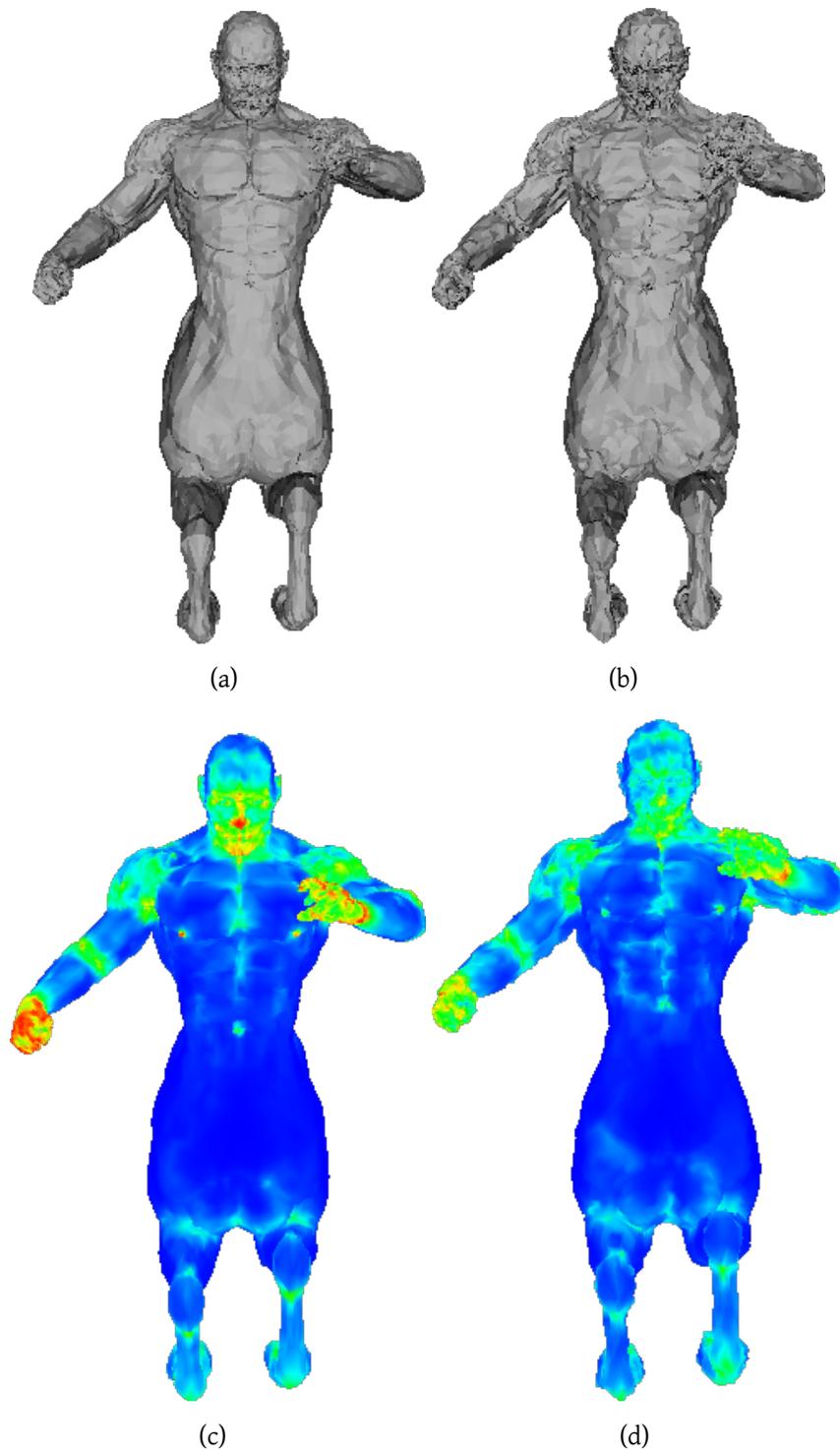


FIGURE 1.22: Robustesse au bruit : a) Maillage 3D Centaure bruité (degré = -0.1%), b) Maillage 3D Centaure bruité (degré = -0.2%), c) Saillance multi-échelle du Centaure bruité avec un degré de -0.1% $NMSE=3.27098e-06$ et d) Saillance multi-échelle du Centaure bruité avec un degré de -0.2% $NMSE=1.1485e-05$.

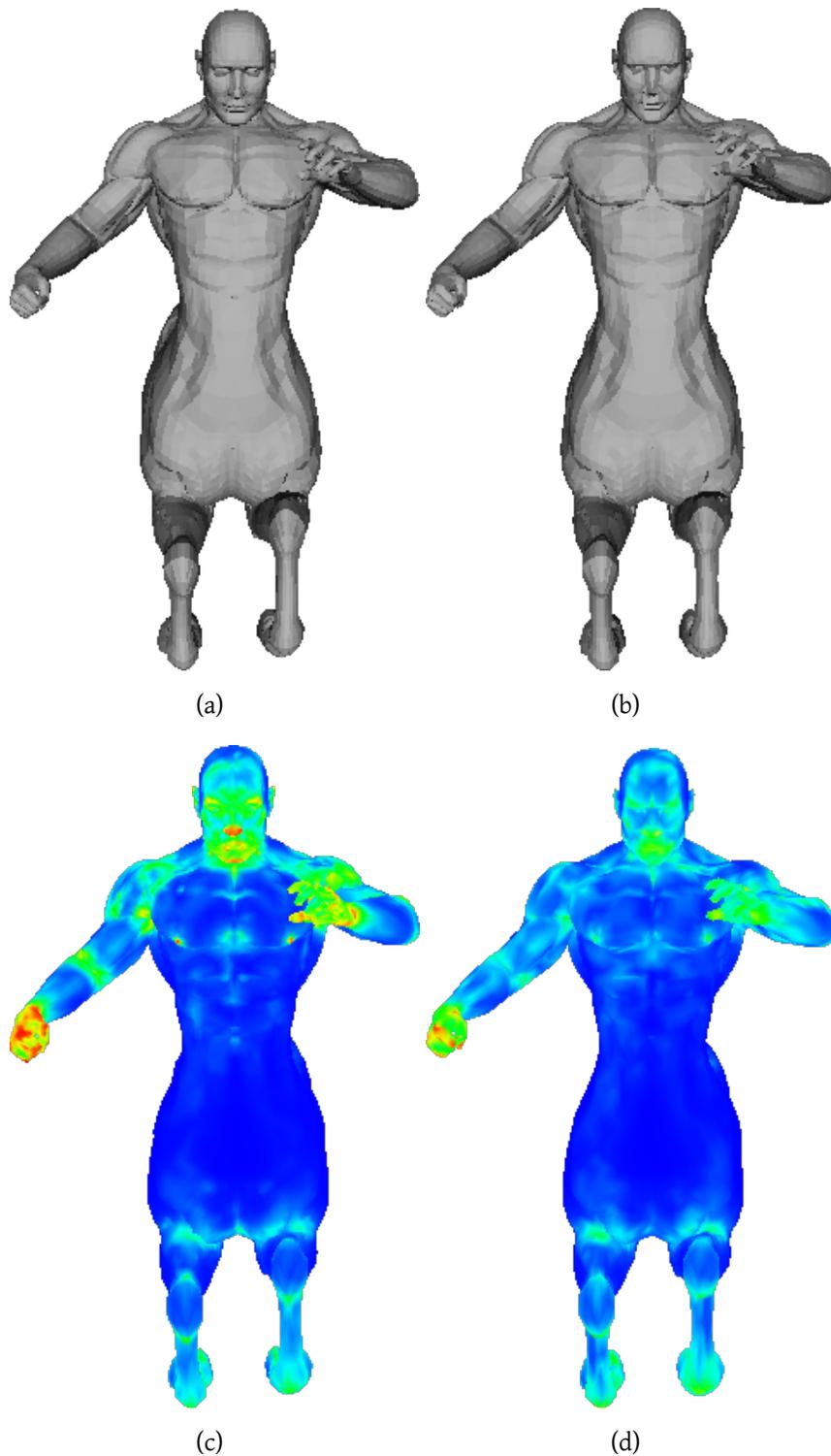


FIGURE 1.23: Robustesse à la simplification : a) Maillage 3D Centaure simplifié à 25%, b) Maillage 3D Centaure simplifié à 50%, c) Saillance multi-échelle du Centaure simplifié à 25% et d) Saillance multi-échelle du Centaure simplifié à 50%.

1.6 Résultats de la saillance visuelle détectée sur les maillages 3D colorés

1.6.1 Construction d'une base de maillages colorés

Il n'existe actuellement aucune base de maillages 3D colorés dans la littérature servant à évaluer les algorithmes de détection de la saillance ou à estimer la qualité visuelle. Par conséquent, nous avons construit une base de maillages colorés pour évaluer l'extension de notre modèle de saillance aux maillages colorés avec le scanner 3D du laboratoire. 17 objets 3D ont été scannés par un scanner 3D laser de marque *NextEngine* muni d'une plaque tournante qui permet d'acquérir à la fois les propriétés géométriques et colorimétriques de l'objet (figure 1.24). La figure 1.25 présente quelques maillages acquis.



FIGURE 1.24: Objet 3D en cours d'acquisition au sein du laboratoire GREYC.

Type de dégradation
Bruit gaussien sur les coordonnées 3D
Simplification
Bruit gaussien sur les couleurs RGB
Lissage sur les coordonnées 3D
Lissage sur les couleurs RGB

TABLE 1.2: Distorsions utilisées dans la base de maillages 3D créées.

Dans un contexte d'évaluation de la qualité visuelle des maillages 3D, des métriques sont mises en œuvre pour associer une note de qualité à un maillage dégradé qui soit la plus proche possible des notes fournies par les observateurs humains. Ces maillages dégradés doivent refléter au mieux les distorsions que peuvent subir les maillages 3D lors



FIGURE 1.25: Quelques maillages 3D de la base de maillages colorés construite.

des traitements communs. Pour cela, nous considérons une large gamme de distorsions (c.f. table 1.2) que l'on applique au corpus original suivant trois degrés de distorsions : faible, moyen et important. Afin de prendre en compte le masquage visuel que certaines régions peuvent avoir selon leur géométrie ou leur texture, les distorsions ont été appliquées suivant quatre aspects : 1) uniformément (les distorsions sont appliquées sur toute la surface du maillage), 2) sur les zones rugueuses, 3) sur les zones lisses et 4) sur les couleurs du maillage.

Afin de distinguer les zones rugueuses des zones lisses, nous avons implémenté la méthode de [Wang et al., 2012] (décrite dans la section 4.2.3) pour générer une carte de rugosité associant à chaque nœud du maillage une valeur de rugosité dans l'intervalle $[0, 1]$. Pour dégrader une zone rugueuse ou lisse du maillage, il est nécessaire de modifier les coordonnées du nœud v_i appartenant à cette zone :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_i + \text{bruit} \times \text{rugosité}(v_i) & \text{dégradation des zones rugueuses} \\ \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_i + \text{bruit} \times (1 - \text{rugosité}(v_i)) & \text{dégradation des zones lisses.} \end{array} \right\}$$

Le même processus est considéré pour dégrader les couleurs des maillages 3D. Ainsi la base de maillages colorés construite contient un nombre total de 425 maillages colorés (17 maillages de référence + $17 \times 3 \times 8$ maillages dégradés). La figure 1.26 présente des exemples de maillages dégradés du corpus final.

1.6.2 Analyse et résultats

Pour illustrer la distinction effectuée entre la saillance colorimétrique et la saillance géométrique des maillages 3D, nous considérons la figure 1.27 présentant un scan 3D d'une tête humaine. La figure 1.27(b) montre la saillance géométrique prenant en compte uniquement les coordonnées des nœuds pour construire les patchs locaux adaptatifs. Nous pouvons remarquer que les régions planes apparaissent non saillantes alors que les régions fluctuantes non répétitives sont jugées saillantes. Par ailleurs, la figure 1.27(c) présente la saillance colorimétrique se basant uniquement sur les couleurs des nœuds lors de la construction des patchs. Ce résultat est très différent du résultat de la saillance géométrique. En effet, les régions ayant des variations de couleurs importantes comme les yeux et les sourcils apparaissent dorénavant saillantes. Les tâches blanches qui étaient jugées non saillantes sur la carte de saillance géométrique sont dorénavant mises en exergue. De la même manière, la couleur de peau du visage et les zones sombres y appartenant non détectées sur la carte de saillance géométrique sont désormais prises en compte sur la carte de saillance colorimétrique.

Le même apport de la couleur dans la saillance visuelle détectée peut être perçu sur la figure 1.28. Le collier blanc du canard crée un fort contraste en raison des deux couleurs



(a) Maillage 3D coloré original

(b) Coordonnées affectées uniformément par le bruit gaussien.



(c) Coordonnées des zones rugueuses affectées par du bruit Gaussien.

(d) Coordonnées des zones lisses affectées par du bruit Gaussien.



(e) Couleurs RVB affectées uniformément par du bruit Gaussien.

(f) Coordonnées affectées uniformément par un lissage isotropique.



(g) Coordonnées des zones rugueuses affectées par un lissage isotropique

(h) Couleurs RVB affectées par un lissage isotropique

FIGURE 1.26: Quelques maillages 3D dégradés de la base de maillages colorés construite.

le délimitant (verte et bleue). Celui ci est jugé très saillant sur la carte de saillance colorimétrique du canard alors qu'il était considéré comme moyennement saillant par le modèle de saillance géométrique.

La figure 1.29 présente la saillance colorimétrique de quelques maillages de la base construite. Nous pouvons remarquer encore une fois la même précision de notre modèle de prédiction de la saillance. Tous les résultats relatifs à la saillance colorimétrique ont été calculés dans l'espace couleur RVB. La figure 1.30 présente les résultats de la saillance colorimétrique des maillages représentant un canard et une tête humaine dans différents espaces couleurs.

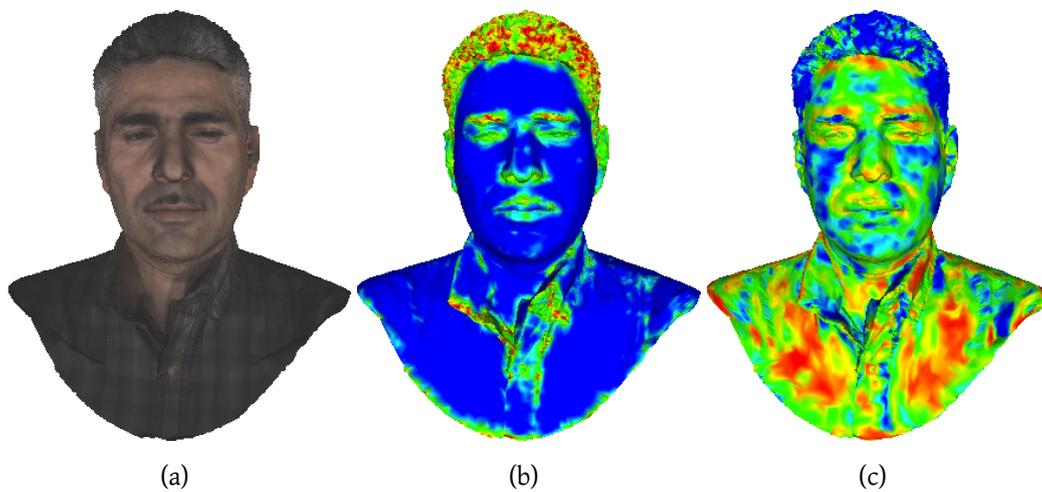


FIGURE 1.27: Saillance multi-échelle d'un maillage coloré scanné représentant une tête humaine : a) maillage 3D coloré, b) saillance multi-échelle géométrique estimée avec notre approche et c) saillance multi-échelle colorimétrique estimée avec notre approche.

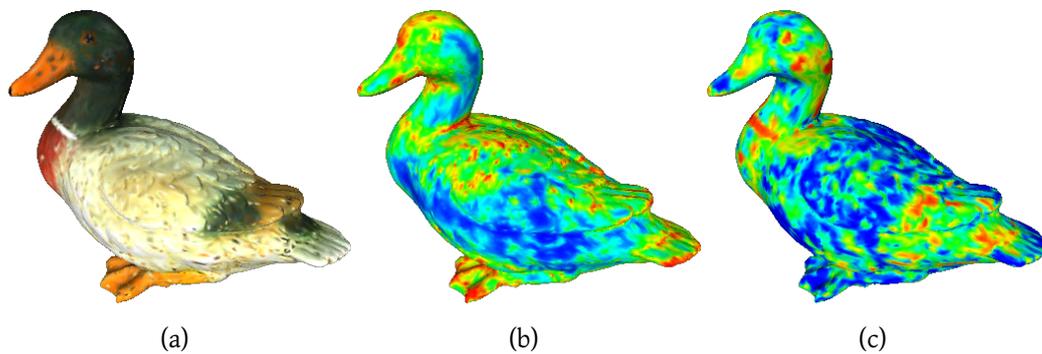


FIGURE 1.28: Saillance multi-échelle d'un maillage coloré résultat d'un scan représentant un canard empaillé : a) maillage 3D coloré, b) saillance multi-échelle géométrique estimée avec notre approche et c) saillance multi-échelle colorimétrique estimée avec notre approche.

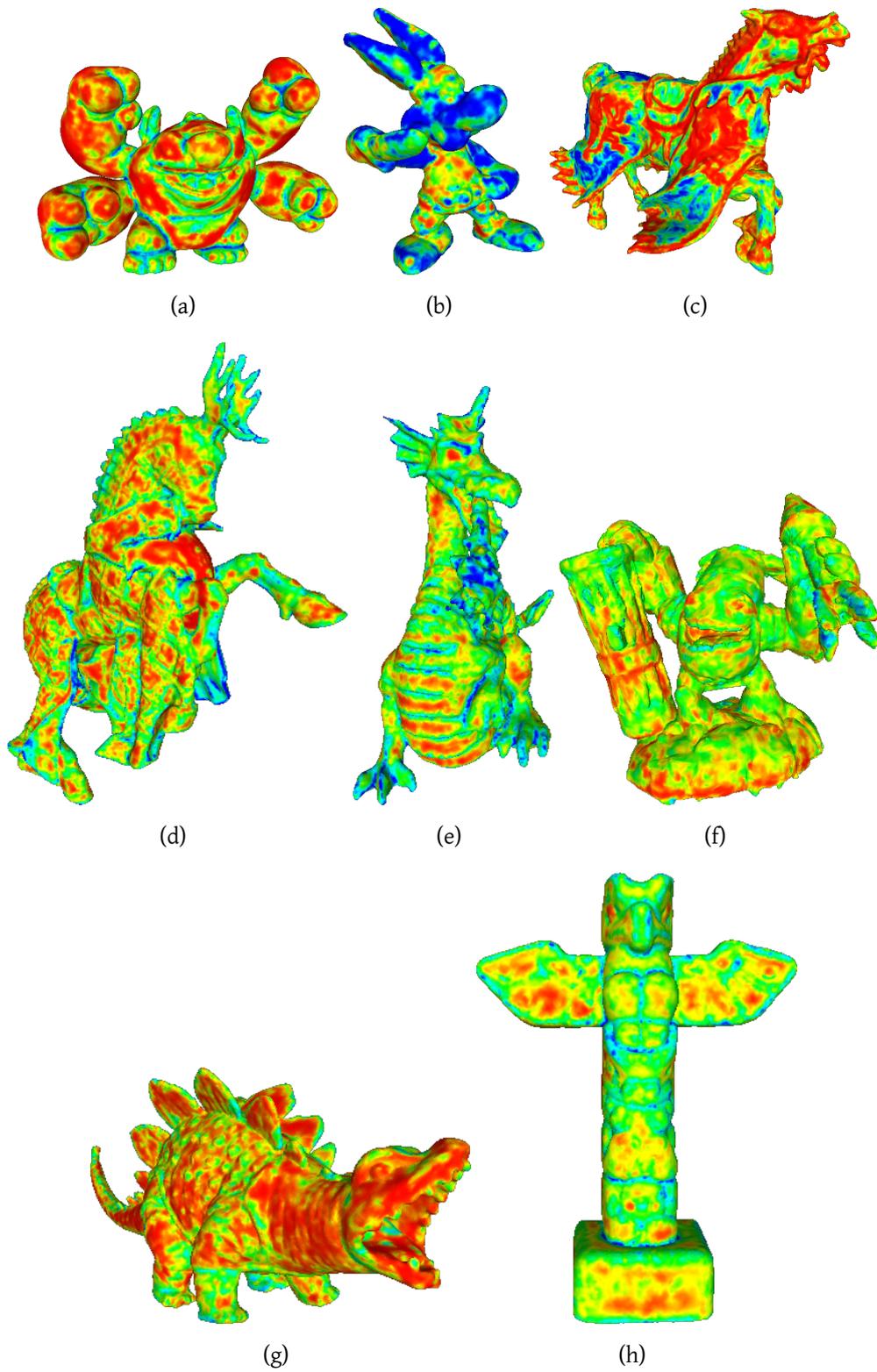


FIGURE 1.29: Saillance visuelle colorimétrique des maillages 3D présentés sur la figure 1.25.

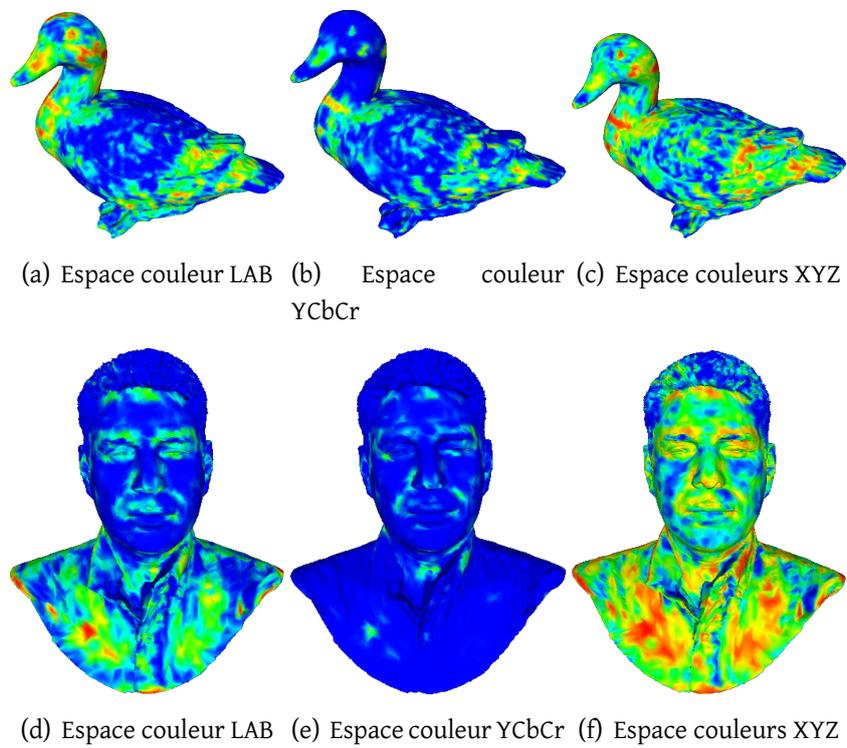


FIGURE 1.30: Saillance multi-échelle calculée dans les espaces couleurs LAB, YCbCr et XYZ [Ford and Roberts, 1998].

1.6.3 Robustesse au bruit géométrique et au bruit sur les couleurs

Nous testons la robustesse de notre modèle de saillance colorimétrique sur les maillages colorés bruités appartenant à la base construite. Deux distorsions ont été retenues pour ce test : un bruit gaussien uniforme affectant les coordonnées 3D et un bruit gaussien affectant les couleurs RVB du maillage coloré. La figure 1.31 présente les résultats de détection de la saillance colorimétrique sur les maillages colorés dégradés. Nous pouvons remarquer que malgré les distorsions dégradant les coordonnées 3D ou les couleurs RVB du maillage coloré, les zones saillantes détectées initialement (figure 1.31(b)) sont toujours considérées saillantes (figure 1.31(d) et figure 1.31(f)). Ceci permet de montrer que l'extension du modèle de saillance aux maillages colorés est aussi stable et robuste que le modèle de saillance destiné aux maillages non colorés.

1.7 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté dans ce premier chapitre un modèle de saillance pour les maillages 3D non colorés. Ce dernier fournit une carte de saillance multi-échelle pointant les zones à fort potentiel de saillance en prenant en compte uniquement les coordonnées 3D du maillage cible. Des descripteurs locaux sous forme de patchs de taille adaptative remplis par un champ local des hauteurs de projections dépendant du voisinage sphérique servent à caractériser la surface du maillage. Nous avons vu qu'un voisinage sphérique de rayon ϵ important permet une détection plus accentuée de la saillance (détection des zones saillantes larges sur la surface du maillage), alors qu'un rayon restreint conduit à détecter uniquement les zones saillantes fines associées aux petits détails. Les cartes de saillance présentées dans les sections précédentes dépendent d'un voisinage sphérique relatif à un rayon défini manuellement pour chaque maillage. Pour les applications nécessitant une carte de saillance correspondant à une analyse très locale de la surface, celles-ci devront opter pour un voisinage sphérique réduit (rayon ϵ faible). Par ailleurs, celles nécessitant une carte de saillance associée à une analyse moins locale de la surface considéreront un voisinage plus élargi. Néanmoins, pour les applications nécessitant une carte de saillance calculée en temps réel, le rayon du voisinage doit être calculé automatiquement. Nous avons remarqué à travers les expérimentations que le rayon du voisinage sphérique est inversement proportionnel au nombre de nœuds du maillage. Ainsi, une première solution serait de considérer un coefficient de proportionnalité dépendant directement du nombre de nœuds du maillage. Les résultats associés n'ont pas été très satisfaisants. Une autre solution consisterait à prendre en compte la superficie des faces du maillage pour définir le rayon. C'est la piste actuellement privilégiée.

Après la validation de notre modèle de saillance par l'intermédiaire d'une comparaison des résultats associés avec une pseudo vérité terrain, nous avons proposé une

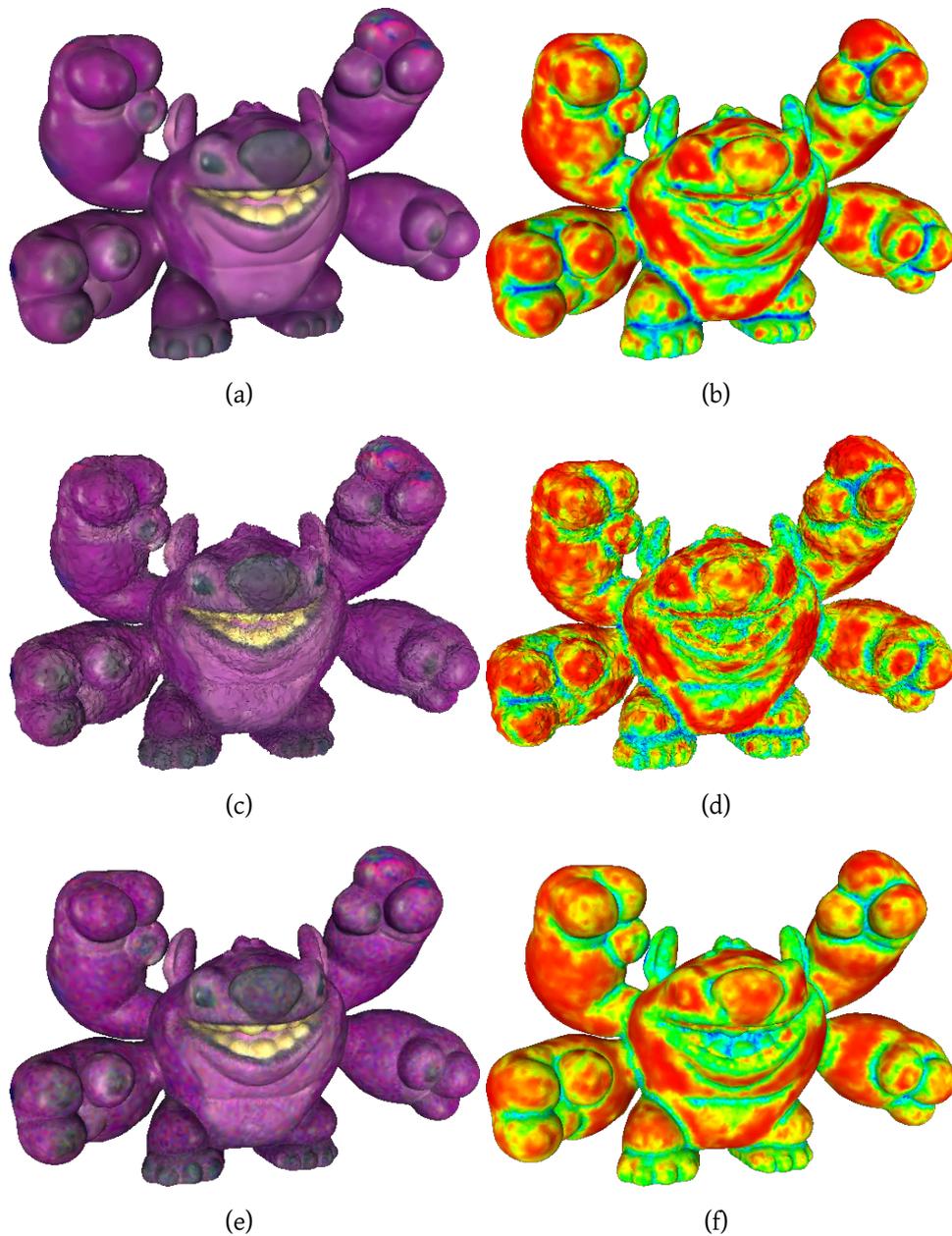
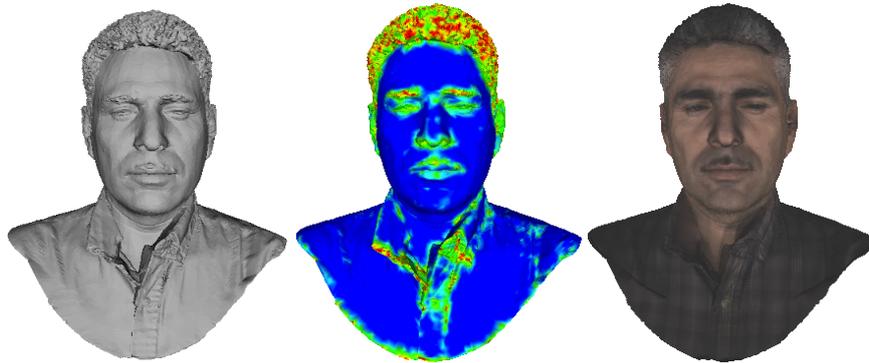
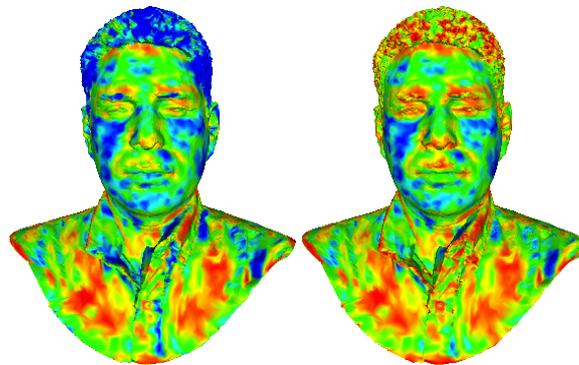


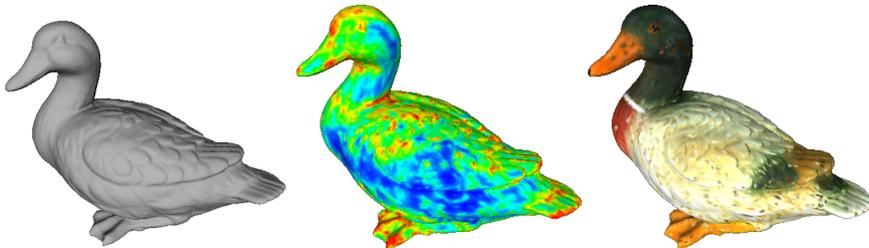
FIGURE 1.31: Robustesse du modèle de saillance colorimétrique au bruit gaussien sur les coordonnées 3D et couleurs RVB : a) maillage coloré de référence, b) saillance colorimétrique de (a), c) maillage coloré dégradé avec du bruit gaussien sur les coordonnées 3D, d) saillance colorimétrique de (c), e) maillage coloré dégradé avec du bruit gaussien sur les couleurs RVB, f) saillance colorimétrique de (e).



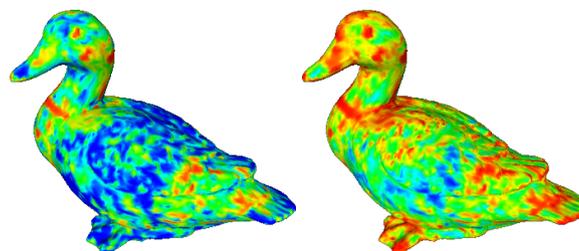
(a) Maillage 3D original (b) Saillance géométrique multi-échelle (c) Maillage 3D coloré non coloré



(d) Saillance colorimétrique multi-échelle (e) Color. \times Géom.



(f) Maillage 3D original (g) Saillance géométrique multi-échelle (h) Maillage 3D coloré non coloré



(i) Saillance colorimétrique multi-échelle (j) Color. \times Géom.

FIGURE 1.32: Saillance multi-échelle globale des maillages colorés.

extension de notre modèle aux maillages 3D colorés. Nous avons pu distinguer la différence existante entre les cartes de saillance colorimétriques et géométriques. Ces cartes peuvent être fusionnées afin de produire une carte de saillance finale prenant en compte la saillance géométrique ainsi que la saillance colorimétrique (le système visuel humain est sensible aux formes et aux couleurs). La figure 1.32 présente le résultat de la fusion des deux cartes de saillance par une simple multiplication. Les cartes de saillance finales (figure 1.32(e) et figure 1.32(j)) semblent plus informatives que les précédentes cartes (géométriques et colorimétriques) prises séparément dans la mesure où elles intègrent la saillance globale du maillage. Evidemment, les deux cartes de saillance pourraient être fusionnées d'une manière plus efficace en prenant en compte les degrés de saillance associés. Nous avons opté pour la simple multiplication des deux cartes de saillance afin de montrer uniquement l'apport de la saillance colorimétrique à la saillance géométrique et réciproquement.

A cause de l'inexistence d'une réelle pseudo vérité terrain relative à la saillance visuelle des maillages colorés, nos prochains travaux auront pour but de mener des expérimentations à l'aide d'un oculomètre afin de produire une pseudo vérité terrain associée à la base construite dans le cadre de cette thèse. Celle-ci permettra de valider le modèle de saillance des maillages colorés proposé.

Nous comptons également construire une pseudo vérité terrain relative à la saillance visuelles des maillages non colorés. En effet, la pseudo vérité utilisée dans le cadre de cette thèse [Chen et al., 2012] et une seconde établie en ligne [Dutagaci et al., 2011] ne s'inscrivent pas totalement dans le cadre du processus attentionnel *Bottom-up*. Lors des expérimentations en ligne associées à la première pseudo vérité terrain, il a été demandé aux observateurs de sélectionner les points qui pourraient être choisis par d'autres personnes. Dans la deuxième, les observateurs manipulaient les maillages en sélectionnant les points qui leur paraissaient intéressants. Ceci prend la forme d'une tâche fournie à l'observateur influençant sa détection de la saillance [Yarbus, 1967]. De plus, aucun oculomètre n'a été utilisé pour suivre les mouvements oculaires sensibles aux propriétés intrinsèques du signal visuel. Par conséquent, une nouvelle pseudo vérité terrain relative à la saillance visuelle associée au processus attentionnel *Bottom-up* est nécessaire pour les maillages non colorés. Ceci constitue un objectif de nos futurs travaux.

Chapitre 2

Champs d'application de la saillance visuelle des maillages 3D

Une fois notre modèle de saillance défini et validé, nous avons mis en oeuvre des applications bénéficiant de ce dernier. Les applications développées répondent aux problématiques de la sélection automatique des points de vues optimaux, de la simplification adaptative, de l'amélioration des détails et du lissage adaptatif des maillages 3D.



2.1 Introduction

À des fins d'optimisation et de vitesse d'exécution, les avancées technologiques relatives aux applications suscitant une interaction avec l'être humain et plus particulièrement avec sa vision prennent de plus en plus en compte les capacités et limitations du système visuel humain.

L'attention visuelle sélective représente un mécanisme important dans notre perception. Celle-ci permet un gain de temps important lors de la visualisation de notre environnement en sélectionnant l'information visuelle potentiellement intéressante tout en ignorant le reste. Nous avons expliqué comment une carte de saillance permet de distinguer les zones pouvant attirer l'attention visuelle de l'observateur humain. Une large gamme d'applications dans la vision 3D par ordinateur tire avantage de cette dernière pour l'optimisation de ses traitements. Nous pouvons citer la sélection des points de vues optimaux [Tal et al., 2012] dont le but est de générer automatiquement le point de vue le plus informatif et le plus attirant ainsi que la simplification adaptative [Shilane and Funkhouser, 2007] ayant pour objectif de compresser davantage les zones non saillantes du maillage 3D afin de préserver au maximum sa qualité. Similairement, d'autres applications bénéficient de l'apport de la saillance visuelle telles que le Surface Matching [Gal

and Cohen-Or, 2006], le redimensionnement automatique [Jia et al., 2014], la reconnaissance faciale [Jinho et al., 2004], la génération d'icône [Shilane and Funkhouser, 2007], le débruitage de maillages [Mao et al., 2006], etc.

Afin d'appliquer et d'évaluer l'apport de notre modèle de saillance, nous avons développé quatre applications l'intégrant. Les deux premières sont associées aux maillages 3D non colorés et les deux dernières aux maillages colorés.

2.2 Application à la sélection des points de vue optimaux des maillages non colorés

Nous proposons une approche permettant de sélectionner automatiquement le point de vue optimal exposant les zones perceptuellement les plus importantes à l'observateur. Le principal critère de notre approche est la distinction des régions dont la saillance visuelle est maximale. Pour cela, après génération de la carte de saillance, nous commençons par sélectionner un point de vue maximisant la saillance le long de l'axe des abscisses en échantillonnant uniformément une sphère englobant notre maillage. Soit vp le point de vue sur l'axe x et $surface(vp)$ les noeuds visibles à partir de ce point de vue. La saillance globale de cette surface est donnée par :

$$\text{SaillanceGlobale}_{axe_x}(vp) = \sum_{v \in surface(vp)} \text{Saillance-multi-échelle}(v) \quad (2.1)$$

Ainsi le point de vue optimal le long de l'axe des abscisses est défini par :

$$vp_x = \max(\text{SaillanceGlobale}_{axe_x}(vp_i)) \quad (2.2)$$

où vp_i représente les différents points de vues sur l'axe des abscisses. À partir de ce point de vue, nous procédons de la même manière pour sélectionner le point de vue optimal global vp_y maximisant la saillance sur l'axe des ordonnées (voir figure 2.1). Une fois ce point déterminé, nous recherchons, en utilisant une descente de gradient, le point de vue optimal sur les trois axes $\mathbf{x}, \mathbf{y}, (\mathbf{y} - 45^\circ)$ à la fois. La figure 2.2 présente les points de vue les plus informatifs de quelques maillages 3D obtenus avec l'approche proposée. Nous pouvons remarquer que les points de vues générés concordent avec les points de vues les plus familiers de ces objets 3D et répondent convenablement au critère de maximisation de la saillance défini ci-dessus.

Notre approche pourrait être également utilisée dans un contexte de valorisation du patrimoine. En effet, pour attirer au maximum l'attention visuelle d'un futur visiteur, il serait pertinent de lui présenter le point de vue le plus informatif et le plus saillant. La figure 2.3 montre un exemple de sélection des points de vues optimaux dans un tel contexte patrimonial.

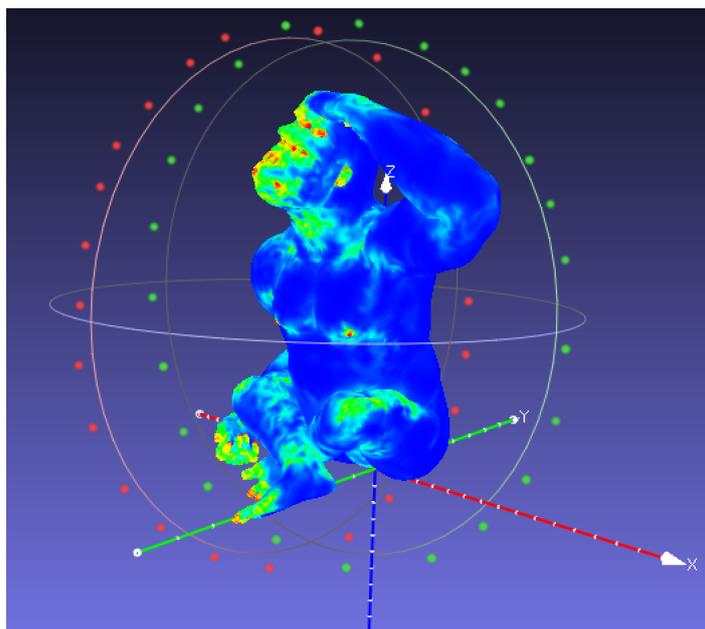


FIGURE 2.1: Illustration d'échantillonnage d'une sphère englobant un maillage le long des axes x et y : les points rouges et verts autour du maillage font référence aux positions desquels les points de vues sont générés. Une sélection du point de vue maximisant la saillance est ensuite effectuée.

La figure 2.4 montre une comparaison entre les points de vues optimaux sélectionnés avec notre approche et ceux obtenus avec l'approche de [Tal et al., 2012]. Nous pouvons remarquer que notre méthode est compétitive avec la méthode de [Tal et al., 2012]. Cependant, quelques limitations sont présentées sur les images (g) et (i).

Pour la sélection des points de vues les plus informatifs, la méthode de [Tal et al., 2012] commence par générer les points de vues candidats en échantillonnant uniformément une sphère englobant le maillage 3D. A partir du point de vue maximisant la saillance, une descente de gradient est opérée pour générer le point de vue le plus informatif. Ensuite une amélioration de la sélection est effectuée en considérant un voisinage local. A contrario, pour rendre le traitement plus rapide, notre méthode génère en premier lieu des points de vues candidats en échantillonnant une sphère englobant le maillage 3D le long des axes des abscisses et des ordonnées, ce qui mène à un nombre moindre de points de vues possibles. Finalement, une descente de gradient est appliquée pour générer le point de vue le plus informatif.

Les limitations dans la sélection des meilleurs points de vues des maillages 3D représentant un piano et une voiture sont dûes à leurs faibles nombres de nœuds (nous pouvons distinguer les faces triangulaires larges sur la surface des ces maillages). En effet, notre approche est basée sur la construction adaptative des patches qui sont remplis par un champ de hauteurs de projections local des nœuds du maillage. Par conséquent,

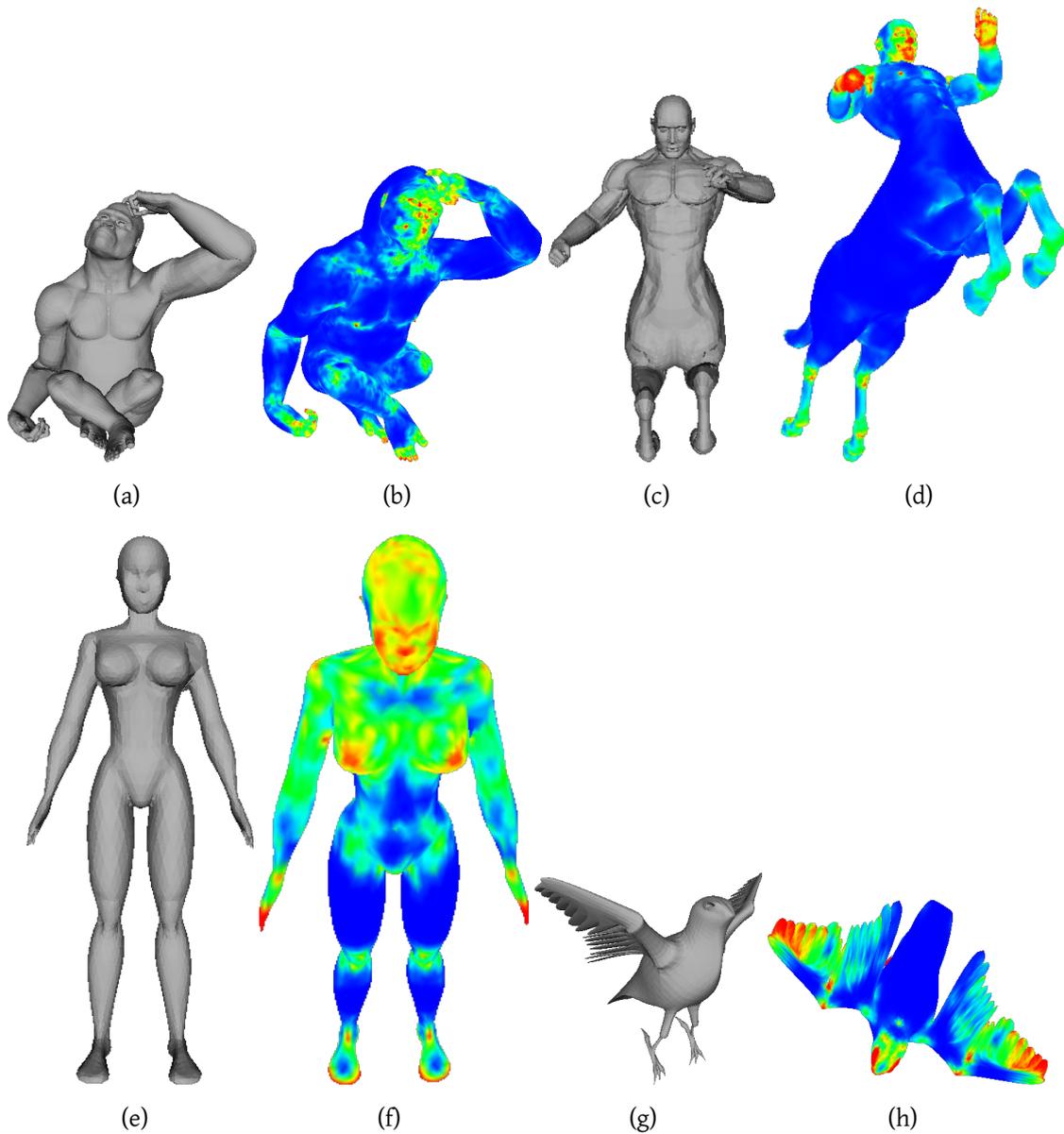
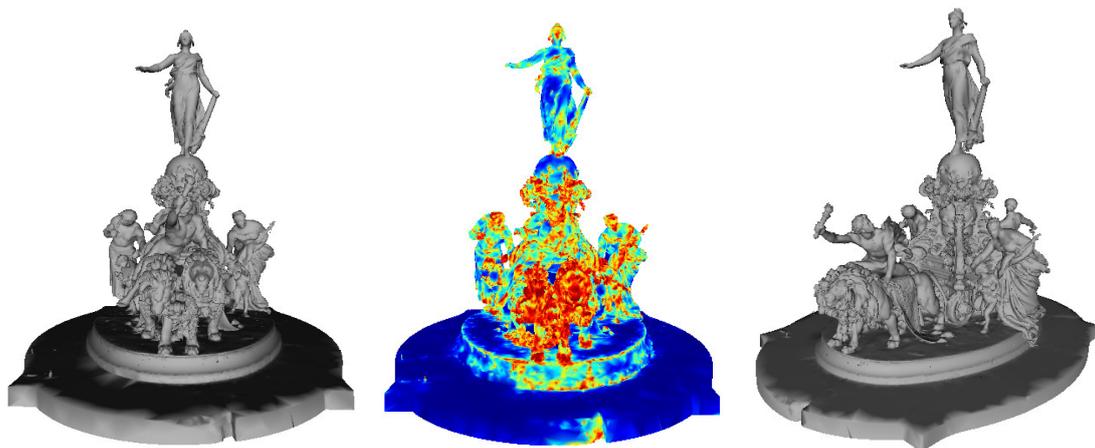


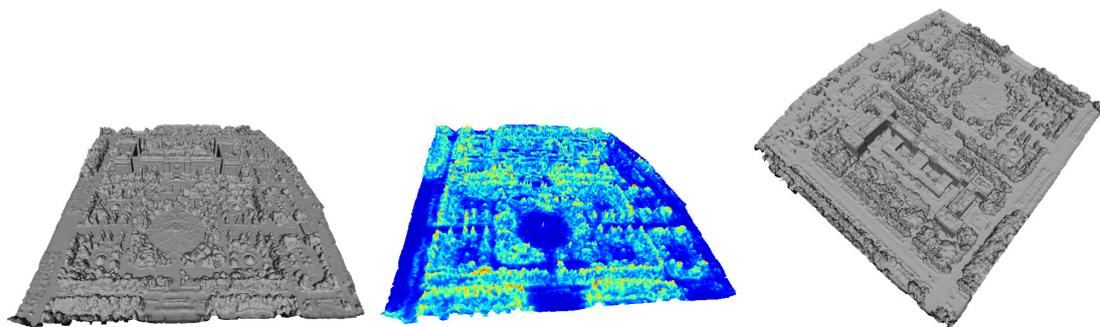
FIGURE 2.2: Les points de vues informatifs générés par notre approche : les images (a), (c), (e) and (g) présentent les points de vues initiaux. Les images (b), (d), (f), and (h) présentent leurs points de vues les plus informatifs sélectionnés automatiquement par notre approche.



(a) Statue "Le triomphe de la république" située sur la place de la nation à Paris et sculptée par Aimé-Jules Delou. Le scan a été obtenu par photogrammétrie à partir de 500 photos haute résolution.

(b)

(c)



(d) Cité russe

(e)

(f)

FIGURE 2.3: Résultats de la sélection automatique des points de vues les plus informatifs de deux patrimoines architecturaux : (a) Maillage 3D d'une statue, (b) saillance multi-échelle de (a), (c) le meilleur point de vue sélectionné par notre approche, (d) maillage 3D représentant une cité russe, (e) saillance multi-échelle de (d) et (f) le meilleur point de vue sélectionné par notre approche.

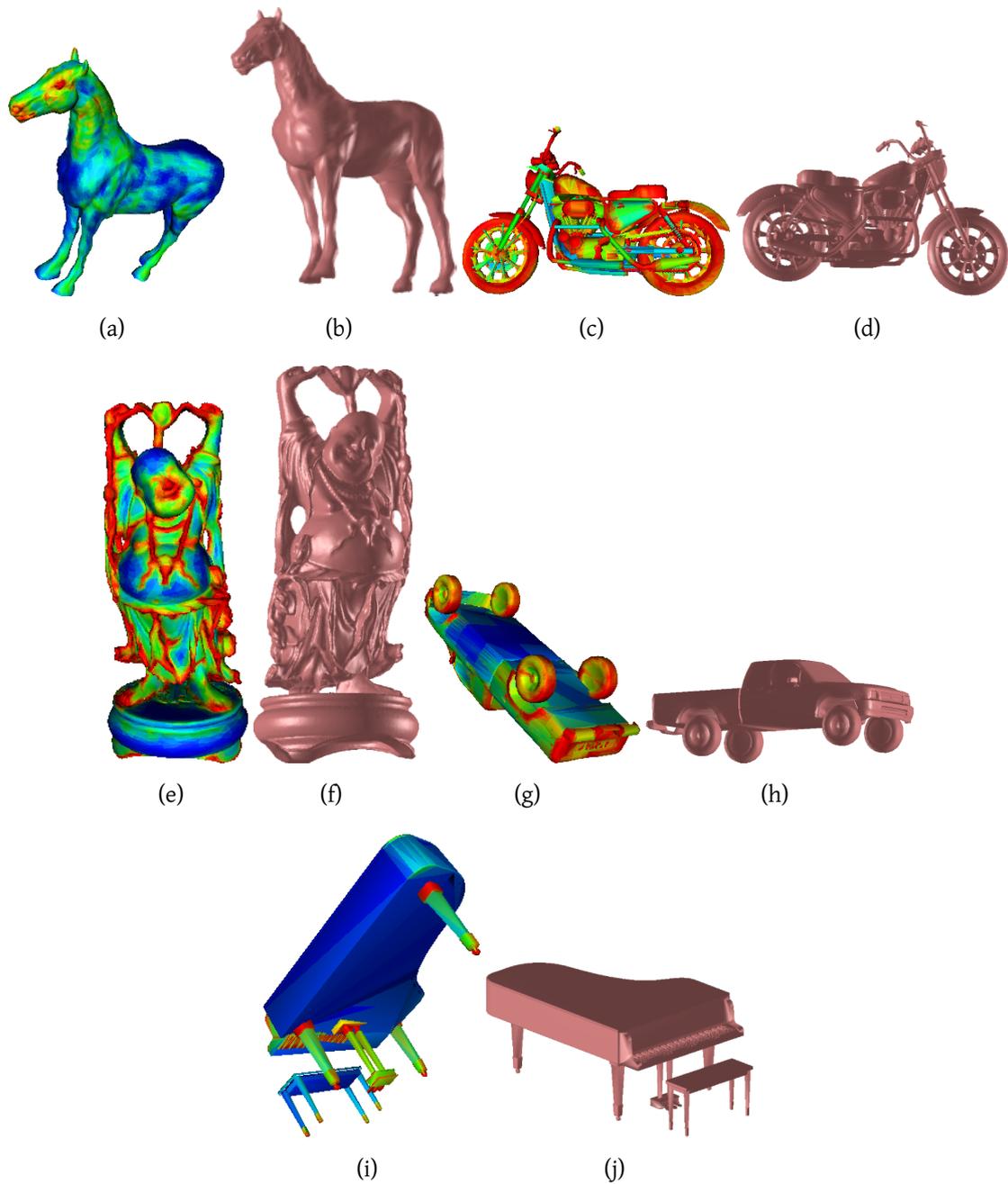


FIGURE 2.4: Comparaison des points de vues les plus informatifs sélectionnés par notre approche avec ceux de l'approche de [Tal et al., 2012] : Les images (a), (c), (e), (g) and (i) présentent les résultats de notre approche. Les images (b), (d), (f), (h) and (j) montrent les résultats obtenus avec la méthode de [Tal et al., 2012].

si le nombre de nœuds est faible, les patches adaptatifs construits pour le calcul de la saillance seront majoritairement vides. En outre, les points de vues optimaux générés pour le maillage Voiture et Piano ne sont pas totalement incohérents dans la mesure où notre approche sélectionne les régions exposant un fort de degré de saillance (*i.e.*, la partie inférieure du piano contient davantage de discontinuités que sa partie supérieure).

2.3 Application à la compression adaptative des maillages 3D non colorés

Afin d'évaluer l'efficacité de notre modèle de saillance, nous avons modifié la méthode de simplification de Garland et Heckbert [Garland and Heckbert, 1997] basée sur les quadriques en pondérant celles-ci par la saillance. L'objectif est de préserver (moins simplifier) les zones visuellement saillantes d'un maillage non coloré lors du processus de la simplification.

L'approche de Garland et Heckbert simplifie un maillage en contractant ses nœuds ordonnés suivant leur erreur quadratique dans l'ordre croissant. Soit p un plan appartenant à l'ensemble des plans P associé aux triangles incidents au nœud v . Ce dernier est défini par les équations $ax + by + cz + d = 0$, $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ et est représenté par le vecteur $(a \ b \ c \ d)^T$. La quadrique du plan p est définie par $Q_p = pp^T$. Garland et Heckbert définissent l'erreur d'un nœud v en considérant le plan p par $v^T Q_p v$. La quadrique Q du nœud v est calculée par la somme des quadriques associés aux plans voisins : $Q = \sum_{p \in P} Q_p$. Après avoir calculé les quadriques de tous les nœuds, l'approche calcule la position du nœud \bar{v} relative à la contraction optimale de chaque paire v_i, v_j minimisant l'erreur quadrique $\bar{v}^T (Q_i + Q_j) \bar{v}$ où Q_i et Q_j représentent respectivement les quadriques des nœuds v_i et v_j . L'approche contracte alors d'une manière itérative toutes les paires possédant un coût de contraction minimal $\bar{v}^T (Q_i + Q_j) \bar{v}$. Après la contraction d'une paire de nœuds v_i, v_j , la quadrique du nœud résultant \bar{v} est définie par $Q_i + Q_j$.

Nous intégrons dans le processus de simplification de l'approche de Garland et Heckbert une carte de pondération représentée par notre carte de saillance multi-échelle MS . Ainsi, lors du calcul des quadriques Q pour chaque nœud v , nous multiplions Q par le poids $MS(v)$ issu de la carte de saillance multi-échelle. Similairement au calcul d'une quadrique après une contraction d'une pair de nœuds, la saillance (et donc la pondération) du nœud résultant \bar{v} est calculée par la somme des valeurs de saillance des nœuds contractés $MS(v_i) + MS(v_j)$.

La figure 2.5 présente les résultats de simplification du maillage représentant une tête humaine avec et sans utilisation de la carte de saillance comme carte de pondération. Nous pouvons remarquer que notre méthode de simplification adaptative basée sur la saillance visuelle préserve les régions saillantes telles que les yeux, le front, les

sourcils, et la bouche dans le cas d'une simplification agressive (figure 2.5(d)). En effet davantage de triangles sont maintenus au niveau de ces régions en comparaison avec la méthode de Garland et Heckbert. Les figures 2.5(e) et 2.5(f) montrent respectivement ces résultats en représentation en fils de fer.

2.4 Application à la manipulation des détails des maillages 3D colorés

Nous traitons dans cette section l'amélioration des détails des maillages 3D colorés en exploitant la saillance visuelle. L'approche décompose le maillage en un nombre de couches capturant chacune une échelle donnée : une première couche représentant une description sommaire très lisse du maillage, une deuxième comprenant les détails intermédiaires du maillage et une dernière représentant les détails fins du maillage. Pour cela, nous utilisons une décomposition basée sur un filtre morphologique OCCO (Open Close Close Open) sur une représentation intermédiaire du signal coloré sur graphe f_0 définie dans [Lézoray, 2017]. Un signal sur graphe, dans notre cas, est une fonction f_0 associant un ensemble de vecteurs couleurs RVB \mathbf{c} aux nœuds du maillage \mathcal{M} $f_0 : \mathcal{G} \rightarrow \mathbf{c} \subset \mathbb{R}^3$. Le schéma de décomposition d'un signal sur graphe f_0 dans notre cas est présenté par la figure 2.6.

La figure 2.7 montre les résultats de la décomposition du maillage représentant une tête humaine en trois échelles : une échelle de base lissée, une échelle représentant les détails moyens du maillage et une échelle représentant les détails fins.

Une fois les trois échelles obtenues, les détails du signal sur graphe peuvent être rehaussés en intégrant la saillance de la manière suivant :

$$\hat{f}(v_i) = F_{\sigma_0}(f_0(v_i)) + ((k + MS(v_i)/N) \times 1 + 1) \times F_{\sigma_1}(f_1)(v_i) + ((k + MS(v_i)/N) \times 2 + 1) \times f_2(v_i) \quad (2.3)$$

où $MS(v_i)$ représente la saillance multi-échelle colorimétrique du nœud v_i , N est le nombre d'échelle (trois dans notre cas), σ_0 et σ_1 sont des paramètres d'échelles du filtre OCCO fixés respectivement à 3 et 2 et k est une constante égale à 0.15. Le facteur multiplicatif appliqué à chaque couche du signal est supérieur à 1 afin de le booster. Le niveau de boosting dépend du niveau de la couche de décomposition et de la saillance.

La figure 2.8 présente l'apport de la saillance (calculée dans différents espaces couleurs) dans le rehaussement des détails d'un maillage 3D scanné représentant une tête humaine. Afin d'évaluer objectivement l'apport de notre modèle de saillance dans le rehaussement des détails, nous mesurons la netteté du maillage de référence \mathcal{M} (signal sur

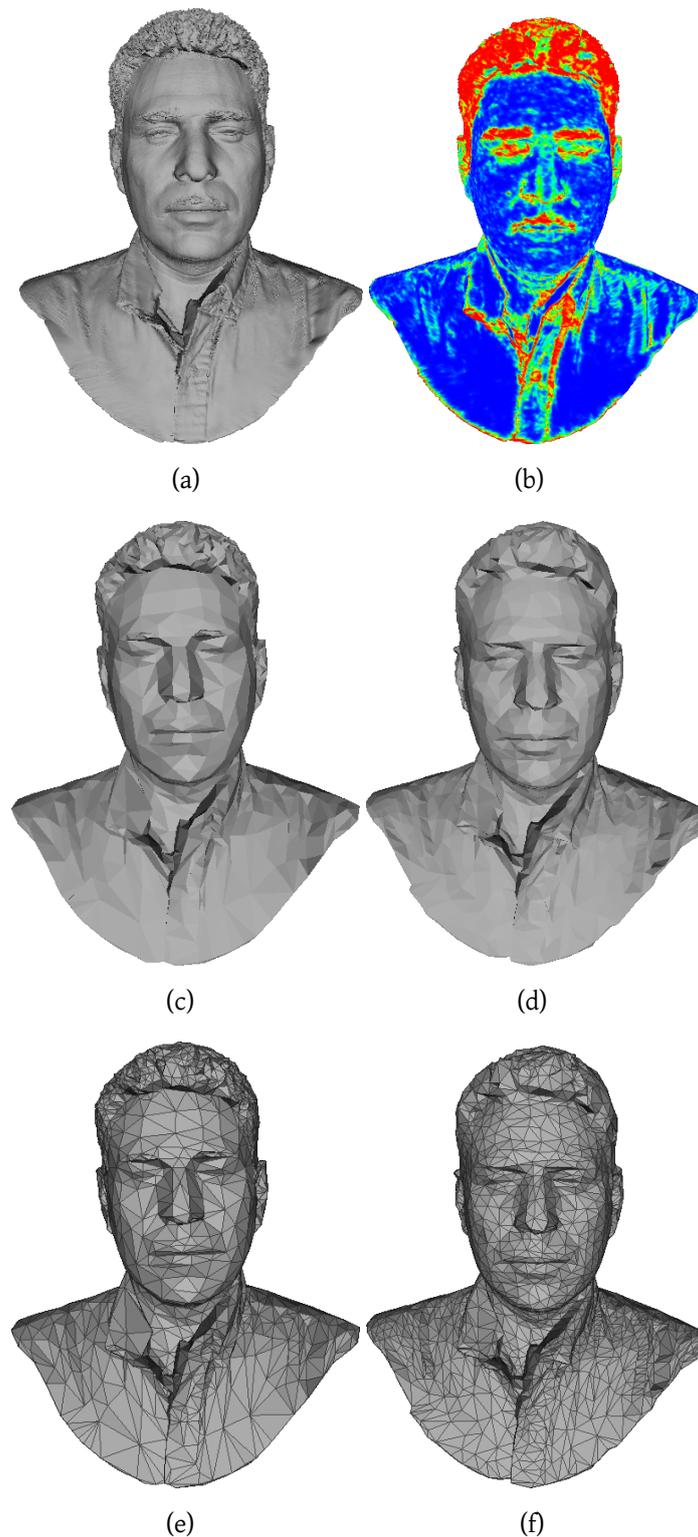


FIGURE 2.5: Résultat de simplification du maillage représentant une tête humaine avec et sans utilisation de la carte de saillance : a) maillage original (276402 faces), b) carte de saillance géométrique de (a), c) maillage simplifié avec la méthode de [Garland and Heckbert, 1997] (5000 faces), d) maillage simplifié avec notre méthode prenant en compte la saillance (5000 faces), e) représentation de (c) en fils de fer et f) représentation de (d) en fils de fer.

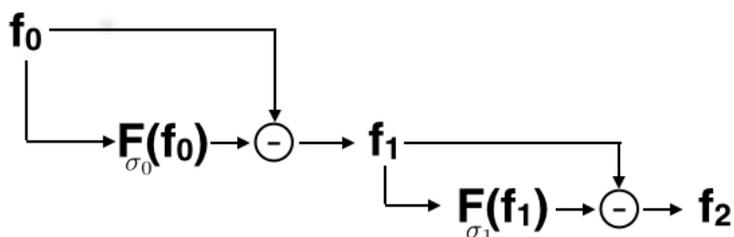


FIGURE 2.6: Décomposition d'un signal f_0 par un filtre F : $F_{\sigma_0}(f_0)$ représente la version sommaire lissée du signal. $F_{\sigma_1}(f_1)$ représente les détails intermédiaires du signal obtenus par le lissage des détails f_1 . f_2 représente les détails fins obtenus par la soustraction du signal lissé $F_{\sigma_1}(f_1)$ et des détails f_1 .

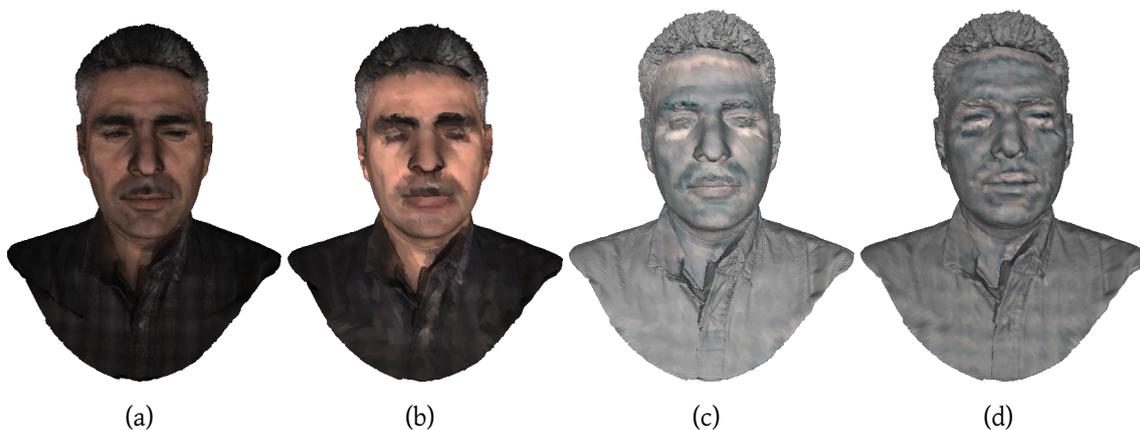


FIGURE 2.7: Résultat de décomposition d'un maillage en 3 échelles. a) Maillage 3D de référence, b) échelle lisse sommaire $F_{\sigma_0}(f_0)$, c) échelle représentant les détails moyens $F_{\sigma_1}(f_1)$ et c) échelle représentant les détails fins f_2 . (À mettre en relation avec la figure 2.6).

graphe f) et du maillage rehaussé $\hat{\mathcal{M}}$ (signal sur graphe \hat{f}) avec le critère de TenenGrad [Xu et al., 2014][Choudhury and Medioni, 2011] adapté aux maillages 3D colorés :

$$TG(f) = \frac{1}{3|\mathcal{V}|} \sum_{v_i \in \mathcal{V}} \sum_{k=0}^3 |\delta(f^k)(v_i) - \epsilon(f^k)(v_i)| \quad (2.4)$$

où les opérateurs morphologiques δ et ϵ sont opérés sur chaque échelle f^k dans un voisinage comprenant les nœuds adjacents au nœud cible.

Nous pouvons remarquer à partir de ces résultats que la saillance permet une amélioration du contraste local sans grossissement des artefacts présents sur la surface du maillage. Dans les différents espaces couleurs, les résultats d'amélioration des détails avec prise en compte de la saillance ont un meilleur rendu visuel. Ceci est confirmé par la mesure objective de netteté de TenenGrad qui fournit des valeurs plus importantes lors de la prise en compte de la saillance.

2.5 Application au lissage adaptatif et au débruitage des maillages 3D colorés

Dans le contexte du traitement de maillages, le lissage ainsi que le débruitage sont d'une importance majeure pour la suppression du bruit pouvant affecter les propriétés géométriques ou colorimétriques d'un maillage. Or, le processus du lissage induit indubitablement une perte de détails sur la surface du maillage altérant ainsi son rendu visuel. Nous proposons de modifier le processus de diffusion défini dans [Elmoataz et al., 2008] opérant un lissage isotropique :

$$\begin{cases} f^{(0)} = f \\ f^{(t+1)}(u) = \frac{\sum_{v \sim u} w(u,v) f^{(t)}(v)}{\sum_{v \sim u} w(u,v)} \quad \forall u \in V \end{cases} \quad (2.5)$$

où f est la même fonction définie dans la section précédente et $w(u, v)$ est le poids de l'arête entre les nœuds u et v (w pouvant représenter n'importe quelle distance de similarité entre les nœuds).

Afin de moins lisser et donc préserver les détails saillants d'un maillage 3D, nous proposons de modifier le processus de diffusion en intégrant la saillance comme suit :

$$\begin{cases} f^{(0)} = f^0 \\ f^{(t+1)}(u) = \frac{\sum_{v \sim u} w(u,v) f^{(t)}(v) MS(u) MS(v)}{\sum_{v \sim u} w(u,v)} \quad \forall u \in V \end{cases} \quad (2.6)$$

où $MS(u), MS(v)$ représentent la saillance multi-échelle colorimétrique des nœuds u et v et $w(u, v)$ est la similarité colorimétrique définie par :

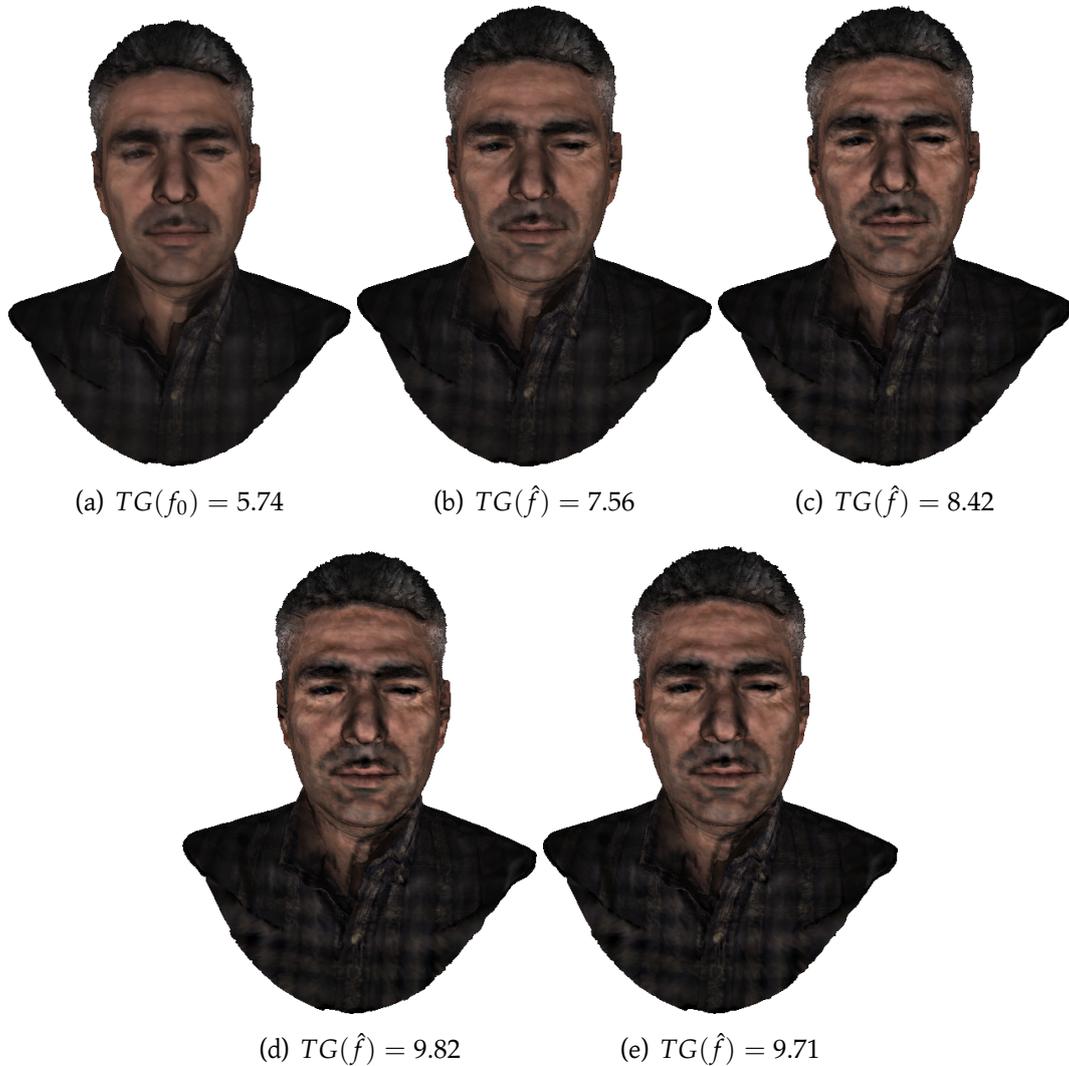


FIGURE 2.8: Rehaussement des détails de maillages 3D colorés basé sur la saillance visuelle : a) maillage 3D coloré de référence, b) maillage rehaussé sans prise en compte de la saillance dans RVB ($MS(v_i)/N = 0$ dans l'équation 2.3), c) maillage rehaussé avec prise en compte de la saillance dans RVB, d) maillage rehaussé avec prise en compte de la saillance dans LAB, e) maillage rehaussé avec prise en compte de la saillance dans YCbCr.

$$w(u, v) = \exp\left(\frac{\|\mathbf{c}(v) - \mathbf{c}(u)\|_2^2}{\sigma_{\mathbf{c}}(u)\sigma_{\mathbf{c}}(v)}\right) \quad (2.7)$$

où $\sigma_{\mathbf{c}}(v) = \max_{v \sim u} (\|\mathbf{c}_u - \mathbf{c}_v\|_2)$

La figure 2.9 présente une comparaison entre le résultat de lissage d'un maillage coloré représentant une tête humaine de notre méthode et celui de la méthode de [Elmoataz et al., 2008]. Nous pouvons remarquer que la méthode de [Elmoataz et al., 2008] fournit un résultat flou (figure 2.9(b)) en comparaison avec le nôtre (figure 2.9(c)). Ceci est plus particulièrement perceptible au dessus des sourcils et du front comme le montre la figure 2.10. Egalement, l'aspect du maillage lissé avec notre méthode semble avoir un meilleur rendu visuel.



FIGURE 2.9: Lissage isotropique VS lissage isotropique adaptatif : a) Maillage coloré de référence, b) maillage lissé avec la méthode de [Elmoataz et al., 2008] (100 itérations) et c) maillage lissé avec notre méthode (100 itérations).

La figure 2.11 présente les résultats de débruitage d'un maillage coloré dont les couleurs sont affectées par un bruit Gaussien. Il est facilement remarquable que la saillance intégrée dans le processus du lissage permet de supprimer le bruit tout en préservant le contraste autour des yeux, de la bouche et du ventre du maillage 3D coloré. Le résultat de notre méthode apparaît moins lissé que celui de la méthode de [Elmoataz et al., 2008].

2.6 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté dans ce chapitre quatre applications de notre modèle de saillance pour le traitement des maillages 3D colorés et non colorés. La contribution de l'information liée à la saillance est notable dans toutes ces applications. Nous proposons quelques

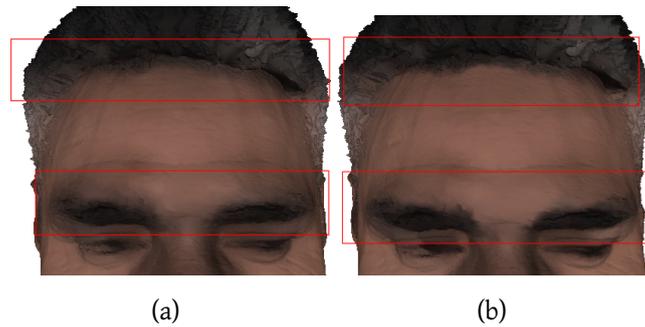


FIGURE 2.10: Lissage isotropique VS lissage isotropique adaptatif avec zoom : a) zoom le maillage lissé avec la méthode de [Elmoataz et al., 2008] (100 itérations) et b) zoom sur le maillage lissé avec notre méthode (100 itérations).

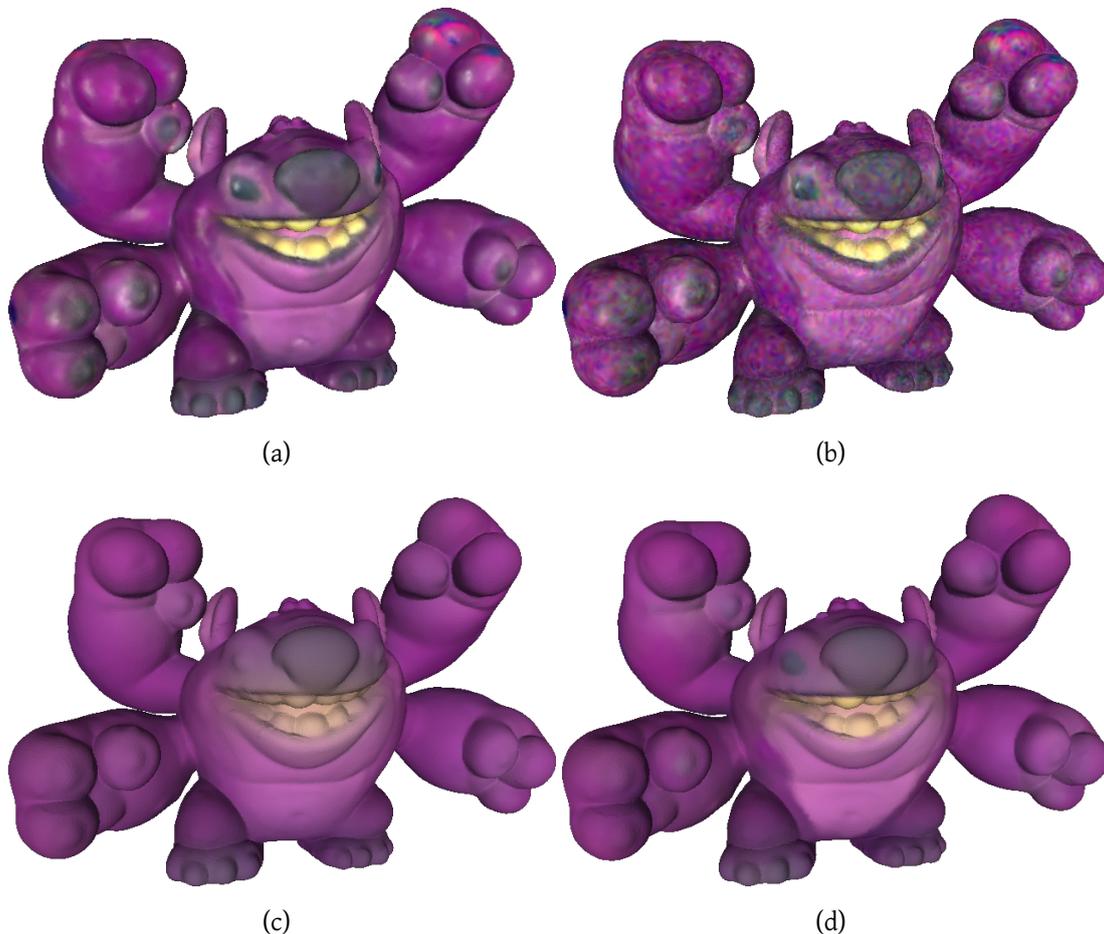


FIGURE 2.11: Débruitage de maillages 3D colorés : a) maillage 3D coloré de référence, b) maillage dont les couleurs RVB sont bruitées avec un bruit Gaussien, c) maillage débruité avec la méthode de [Elmoataz et al., 2008] et d) maillage débruité avec notre méthode

améliorations constituant les perspectives de notre travail en ce qui concerne les applications de la saillance :

Application à la sélection des points de vues optimaux des maillages 3D non colorés :

une amélioration de notre algorithme consisterait à effectuer une recherche localisée autour du point de vue le plus optimal généré. Ceci permettrait d'affiner davantage le point de vue maximisant la saillance.

Application à la compression adaptative des maillages 3D non colorés :

lors du processus de la compression adaptative basées sur la saillance, les nœuds saillants sont préservés en fonction de leur degré de saillance. Nous estimons que les nœuds saillants seraient davantage préservés si leur degré de saillance est plus élevé. Ainsi, nous envisageons d'amplifier les valeurs de saillance supérieures à un seuil défini afin que les nœuds (et par extension les régions) associés soient maintenus lors de la compression.

Application à la manipulations des des détails et au débruitage des maillages 3D colorés :

la saillance colorimétrique des maillages 3D a été intégrée dans le cadre de ces deux applications. Néanmoins, une combinaison astucieuse de la saillance colorimétrique et de la saillance géométrique des maillages 3D pourrait mener vers de meilleurs résultats. Cette question n'a toujours pas été traitée dans la littérature. Notre modèle de saillance est capable de fournir une carte de saillance géométrique et colorimétrique à la fois. Par conséquent, nos futurs travaux auront pour but de combiner ces deux informations pertinentes dans le cadres des applications manipulant les maillages 3D colorés.

Deuxième partie
Evaluation de la qualité des maillages
3D

*"Quality is the integrated perception of the overall degree of
excellence of the image - Peter G. Engeldrum, 2004"*

Chapitre 3

Métrie d'évaluation de la qualité avec référence des maillages 3D non colorés

Dans ce chapitre, nous dressons un état de l'art des métriques d'évaluation de la qualité avec référence des maillages 3D non colorés puis nous présentons et détaillons le pipeline de notre métrie proposée. Nous terminons par une analyse de sa performance sur deux bases de maillages évalués subjectivement.



3.1 Préambule

Nous vivons dans un monde numérique dans lequel les données tridimensionnelles sont plus présentes que jamais. Avec le développement et la démocratisation des scanners 3D, de larges quantités d'objets 3D sont acquises et représentées sous la forme de maillages triangulaires 3D. Celles-ci sont utilisées dans plusieurs applications prenant en compte les propriétés du système visuel humain comme la compression, l'imagerie médicale, la restauration, le tatouage, etc. Ce progrès couplé avec le fait que l'être humain se base fortement sur sa vision, requiert que les maillages 3D représentant les cibles à analyser ou à traiter soient de bonne qualité.

Un maillage 3D peut être amené à subir divers traitements avant d'être exposé à un observateur humain, ce qui peut induire des distorsions qui affectent son rendu visuel. La première dégradation pouvant affecter un maillage 3D lors de son acquisition est le bruit du capteur. Ensuite, pour une transmission optimale, le maillage peut être simplifié à des fins de réduction de taille et d'allègement de la bande passante. Aussi, pour des raisons de protection des droits d'auteurs et de propriété intellectuelle, un procédé de tatouage peut être appliqué à un maillage. Ce processus, s'il est mal conduit, peut dégrader également la géométrie du maillage non coloré. Dès lors, à supposer qu'une

ou plusieurs des distorsions précédemment énumérées soient appliquées, une évaluation de la qualité perceptuelle devient nécessaire pour quantifier l'impact visuel de ces distorsions sur la géométrie du maillage présenté au consommateur final, et qui est en l'occurrence l'observateur humain.

Nous commençons dans ce qui suit par décrire brièvement une caractéristique du SVH influant notre perception et qui est aussi très utilisée dans l'évaluation de la qualité objective des images 2D et des maillages 3D. Ensuite, nous présentons les deux types d'évaluation de la qualité : évaluation subjective et objective de la qualité. Alors que la première approche fait appel aux observateurs humains pour évaluer et fournir un score de qualité à un maillage 3D, la deuxième vise à mettre en oeuvre des algorithmes d'évaluation automatique de la qualité perçue appelés *métriques*. Ces derniers fournissent un score de qualité devant être en concordance avec les scores des observateurs humains.

3.1.1 Le système visuel humain et la perception de la qualité

3.1.1.1 L'effet du masquage visuel

Le masquage visuel représente une caractéristique principale du SVH ayant fortement été utilisée dans l'évaluation de la qualité des maillages 3D. Celui-ci peut être défini par la réduction de la visibilité d'un stimuli (signal masqué) due à la présence simultanée d'un autre (signal masquant). Le degré du masquage est mesuré par la variation de la visibilité du signal lors de la présence et de l'absence du masquant. Généralement, ce degré est important lorsque la localisation spatiale, le contenu fréquentiel et l'orientation du signal masqué et masquant sont similaires.

Dans le contexte des maillages 3D, le masquage visuel peut se produire lorsqu'une région rugueuse est capable de dissimuler une distorsion. La figure 3.1 illustre ce cas. Nous pouvons remarquer que le bruit ajouté est très apparent lorsqu'il est appliqué à une surface lisse contrairement à une surface rugueuse.

3.1.1.2 La perception de la qualité des maillages 3D

Alors que l'évaluation objective de la qualité des images 2D a connu des avancées notables [Wang and Bovik, 2006][Wang and Bovik, 2011], celle des maillages 3D en est encore à ses débuts [Corsini et al., 2013][Guo et al., 2016]. Plusieurs auteurs ont choisi d'utiliser les métriques d'évaluation de la qualité des images 2D basées sur une bonne compréhension des facteurs psychovisuels et physiologiques dans le contexte des maillages 3D [Qu and Meyer, 2008] [Bolin and Meyer, 1998][Zhu et al., 2010]. Généralement, des prises de vue du maillage sont effectuées, ensuite une métrique spécifique aux images 2D est appliquée pour évaluer la qualité des prises de vues. Cependant, ce type de métrique ne semble pas être adéquat pour l'évaluation de la qualité des maillages 3D comme l'af-

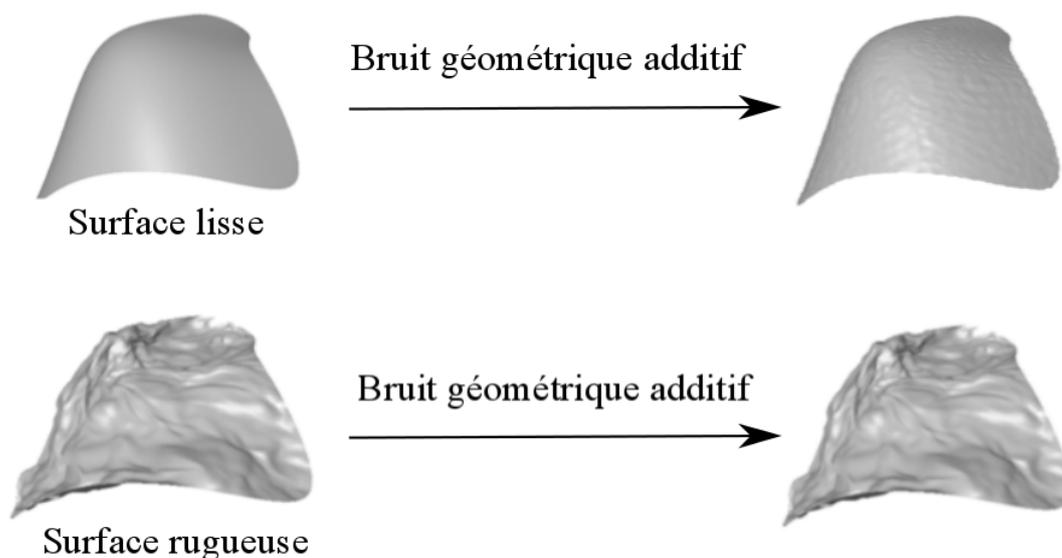


FIGURE 3.1: Illustration du masquage visuel dans le contexte des maillages 3D.

firme l'étude de Rogowitz *et al.* [Rogowitz and Rushmeier, 2001]. Dans cette étude, les auteurs montrent que la profondeur, l'animation, et la direction de l'illumination des maillages 3D affectent la perception de leur qualité. Par exemple pour la simplification, les distorsions engendrées par celle-ci sont peu perceptibles lorsque le maillage 3D est animé et lorsqu'il est illuminé de face. L'étude conclut que les métriques basées modèles opérant directement sur la géométrie prédisent mieux la qualité des maillages 3D. Plus récemment, l'étude de Lavoué *et al.* [Lavoué *et al.*, 2016] compare les performances de six métriques basées images avec quatre métriques basées modèles. Les résultats associés montrent que les métriques basées image évaluent avec précision la qualité des maillages 3D lorsqu'un seul type de dégradation est considéré dans le corpus. Dans des scénarios plus complexes dans lesquels différents types de distorsions sont présents, les métriques basées modèles surpassent les métriques basées images en terme de corrélation avec les scores des observateurs humains. Ainsi, les métriques d'évaluation de la qualité des maillages 3D non colorés proposées dans le cadre de cette thèse sont des métriques basées modèles opérant directement sur la géométrie.

3.1.2 Évaluation subjective de la qualité

Malgré la prolifération des métriques d'évaluation de la qualité des images 2D et les avancées que connaissent en ce moment les approches de prédiction de la qualité perçue des maillages 3D, les êtres humains demeurent les seuls juges fiables de la qualité de n'importe quel contenu multimédia. Par conséquent, les scores fournis par toute métrique d'évaluation de la qualité doivent être conformes avec les scores des observateurs humains obtenus dans le cadre des tests psychovisuels. Cependant, cette approche d'éva-

luation subjective de la qualité reste inappropriée à cause de la masse de données issue des tests psychovisuels et des coûts financiers et temporels nécessaires [ITU-T Recommendation P.910, 2008]. Elle permet néanmoins de calculer un score de qualité moyen des observateurs appelé MOS (*Mean Opinion Score*) pour chaque maillage 3D présenté. Ainsi les valeurs MOS représenteront les vérités terrains que toute mesure de qualité doit reproduire le plus rigoureusement possible.

Contrairement aux images 2D [ITU-T Recommendation P.910, 2008][ITU, 2002], il n'existe aucun standard d'évaluation subjective de la qualité des maillages 3D. Nonobstant cette déficience, des chercheurs se sont inspirés des standards associés aux images 2D pour mener des campagnes psychovisuelles et générer des vérités terrains rendues publiques relative à la qualité des maillages 3D [Lavoué et al., 2006][Lavoué, 2009][Silva et al., 2009].

3.1.3 Evaluation objective de la qualité

En plus des inconvénients de l'approche subjective d'évaluation de la qualité cités ci-dessus, s'ajoute l'impossibilité d'intégrer cette dernière dans des algorithmes de traitement globaux de maillages à des fins d'optimisation de rendu visuel. Ces algorithmes nécessitent une vitesse d'exécution ainsi qu'une complexité algorithmique optimales, conditions que n'assure pas l'évaluation subjective de la qualité des maillages 3D. L'approche alternative à ces problèmes s'inscrit dans l'évaluation objective de la qualité ayant pour objectif la prédiction de la qualité perçue d'une manière algorithmique. Les objectifs à atteindre lors du développement de telles mesures de qualité peuvent être résumés comme suit :

- ① Fiabilité des scores prédits : les valeurs MOS prédites ou scores de qualité fournis par la métrique doivent être très proches des MOS constituant la vérité terrain.
- ② Reproductibilité : Le code de la métrique doit être stable et capable de fournir des résultats identiques d'un même jeu de données chez différents utilisateurs.

Dans la littérature, les métriques d'évaluation de la qualité sont regroupés en trois grandes familles :

Les métriques avec référence (FR-Full Reference) : Ce type de métriques nécessite que la version de référence (réputée parfaite, sans distorsions) du maillage 3D soit présente dans son intégralité. Celle-ci sera utilisée pour quantifier la différence entre le maillage original et dégradé. C'est pour cela qu'il conviendrait d'utiliser, dans ce contexte, le terme de *mesure de similarité* ou *mesure de fidélité* au lieu de *métrique de qualité* puisque l'objectif final revient à mesurer le degré de conformité du maillage dégradé au maillage de référence. Cette catégorie de métriques est essentiellement

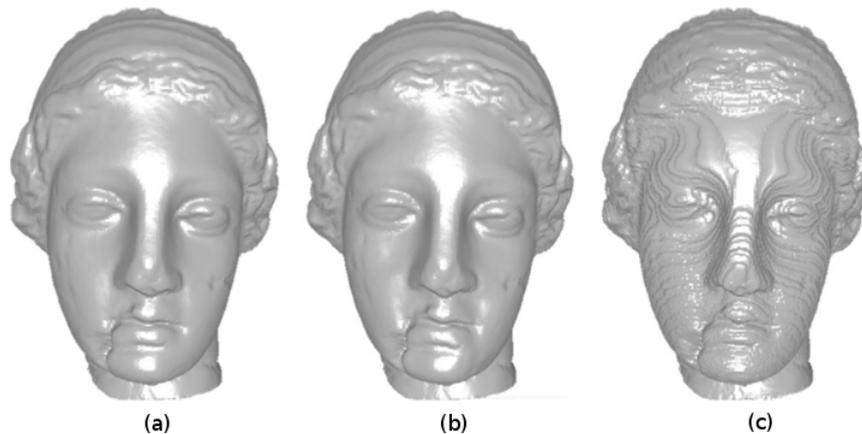


FIGURE 3.2: Métrique géométrique et corrélation avec la perception humaine : a) maillage Venus de référence, b) maillage Venus tatoué avec la méthode de [Wang et al., 2011] et c) maillage Venus tatoué avec la méthode de [Cho et al., 2007]. Les deux maillages tatoués obtiennent un score de qualité similaire 1.52×10^{-3} calculé avec la distance (Maximum Root Mean Squared Error) malgré leur rendu visuel totalement différent. [Figure extraite de [Wang et al., 2012]].

utilisée dans la comparaison des algorithmes de traitement de maillages et dans l'optimisation des algorithmes de compression ou de restauration de maillages. Un autre objectif de ces métriques corrélées à la perception consiste à remplacer les métriques dites géométriques telles que la distance d'Hausdorff ou l'erreur quadratique moyenne (MSE) n'intégrant aucune propriété du SVH ni attribut visuellement corrélé. Ces métriques échouent dans l'évaluation de la qualité perçue comme le montrent [Lavoué and Corsini, 2010][Bulbul et al., 2011] (voir figure 3.2).

Les métriques avec référence réduite (RR-Reduced Reference) : Les métriques d'évaluation avec référence réduite de la qualité ont pour objectif de mesurer la qualité d'un maillage dégradé en ne disposant que d'informations partielles du maillage original. La qualité du maillage dégradé est prédite à partir des caractéristiques extraites du maillage original et du maillage dégradé.

Les métriques sans référence (NR-No Reference) : Les métriques d'évaluation sans référence de la qualité sont considérées comme les plus intéressantes dans la mesure où le maillage de référence n'est pas nécessaire pour estimer la qualité perçue d'un maillage dégradé et peuvent être introduites par conséquent dans tout processus de traitement de maillages 3D. Le domaine d'application de cette catégorie de métriques est très vaste ; elles peuvent opérer dans des systèmes d'acquisition, de compression de communication, d'affichage, de rendu, de tatouage, etc.

3.2 Etat de l'art des métriques de qualité des maillages 3D non colorés

L'axe de recherche traitant les métriques d'évaluation de la qualité perceptuelle des maillages 3D a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs notamment à cause de son utilité expliquée dans le chapitre précédent, mais aussi à cause de son manque de maturité. Les premières métriques d'évaluation avec référence de la qualité étaient purement géométriques et étaient largement utilisées en raison de leur simplicité et de leur temps d'exécution. Nous citons par exemple la *distance d'Hausdorff* [Aspert et al., 2002], l'*erreur quadratique moyenne (RMS)* [Cignoni et al., 1998] et l'*erreur maximale quadratique moyenne MRMS*. Ces métriques fournissent des résultats non corrélés à la perception visuelle humaine. Pour corriger ce problème de corrélation, les chercheurs ont intégré quelques propriétés du système visuel humain. Nous dressons dans ce qui suit un état de l'art des métriques basées modèle appelées aussi *métriques indépendantes de la vue*.

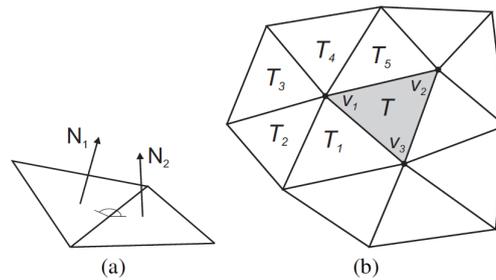


FIGURE 3.3: a) Angle dièdre, b) moyenne de la rugosité $G(\cdot)$ et variance de la rugosité $V(\cdot)$. (voir équation 3.2) [Extrait de [Corsini et al., 2007]

3.2.1 $3DWPM_1$ et $3DWPM_2$

Corsini et al. [Corsini et al., 2007] proposent deux indices d'évaluation de la qualité perçue des maillages 3D tatoués nommées respectivement $3DWPM_1$ et $3DWPM_2$. Disposant d'un maillage de référence et d'un maillage dégradé, leur approche évalue la qualité en calculant la différence entre leurs cartes de rugosités respectives. La première mesure de rugosité considère les angles dièdres des faces du maillage. Un angle dièdre est défini par l'angle entre les vecteurs représentant les normales des faces adjacentes (figure 3.3(a)). A chaque angle dièdre du maillage est associé la quantité de rugosité suivante :

$$\rho_d = 1 - (\mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{N}_2) \quad (3.1)$$

où \cdot est le produit scalaire entre deux vecteurs et ρ_d représente la rugosité associée

à un angle dièdre. Ensuite, pour chacune des faces du maillages, la rugosité associée est calculée par :

$$\rho_1(T) = \frac{G(v_1)V(v_1) + G(v_2)V(v_2) + G(v_3)V(v_3)}{V(v_1) + V(v_2) + V(v_3)} \quad (3.2)$$

où $G(v_1)$ représente la moyenne de la rugosité ρ_d associée aux angles dièdres dépendants des faces : (T, T_1) , (T_1, T_2) , (T_2, T_3) , (T_3, T_4) , et (T_5, T) (figure 3.3(b)). $G(v_2)$ et $G(v_3)$ sont calculés avec le même principe. $V(v_1)$, $V(v_2)$ et $V(v_3)$ représentent quant à eux les variances de la rugosité ρ_d relative aux angles dièdres des faces adjacentes aux nœuds v_1 , v_2 et v_3 . Pour prendre en compte les échelles de la rugosité, le calcul se fait par nœud de la manière suivante :

$$\rho_1^N(v) = \frac{1}{|S_T^N|} \sum_{i \in S_T^N} \rho_1(T_i) A_{T_i} \quad (3.3)$$

avec S_T^N représentant l'ensemble des faces appartenants au voisinage du nœud v représenté par la couronne N , $|\cdot|$ est l'opérateur représentant la cardinalité d'un ensemble et A_{T_i} fait référence à la superficie d'une face T_i .

La rugosité finale d'un nœud, calculée sur trois échelles, est définie par le maximum des valeurs de rugosité calculées sur 3 couronnes (1, 2 et 4) représentant les voisinages du nœud v :

$$\rho_1(v) = \max \left\{ \rho_1^1(v), \rho_1^2(v), \rho_1^4(v) \right\} \quad (3.4)$$

Ainsi, la rugosité globale d'un maillage 3D est calculée par la somme des rugosités des nœuds du maillage :

$$\rho_1(M) = \sum_{i=1}^{N_v} \rho_1(v_i) \quad (3.5)$$

où N_v représente le nombre total des nœuds du maillage.

La seconde mesure de rugosité proposée par Corisini *et al.* [Corisini et al., 2007] est basée sur les différences géométriques entre le maillage de référence et sa version lissée. L'approche commence par générer une version lisse M_S du maillage de référence M en utilisant le filtre de Taubin [Taubin, 1995]. Ensuite la distance d_{OS} entre chaque nœud des maillages M et M^S est calculée de la manière suivante :

$$d_{OS}(v, v^S) = \text{proj}_{\mathbf{n}_v^S}(v - v^S) \quad (3.6)$$

où $\text{proj}(\cdot)$ représente la projection du vecteur $(v - v^S)$ sur la normale de la surface lissée \mathbf{n}_v^S . Ensuite pour chaque nœud v , l'ensemble des distances associées à son voisi-

nage représenté par deux couronnes ($S_d^2(v)$) est construit et sa variance est calculée. Ainsi, la rugosité d'un nœud est calculée par :

$$\rho_2(v) = \frac{V(S_d^2(v))}{A_{S^2}} \quad (3.7)$$

où A_{S^2} représente la superficie totale des faces formant le voisinage représenté par deux couronnes centrées en v . Finalement la rugosité globale du maillage M est donnée par :

$$\rho_2(M) = \sum_{i=1}^{N_v} \rho_2(v_i) \quad (3.8)$$

Une fois les mesures de rugosités définies, Corsini *et al.* les utilisent pour dériver un indice d'évaluation avec référence de la qualité définie par :

$$\log \left(\frac{\rho(M^w) - \rho(M)}{\rho(M)} + k \right) - \log(k) \quad (3.9)$$

où $\rho(M^w)$ et $\rho(M)$ sont respectivement les rugosités totales du maillage dégradé et du maillage de référence. Les deux mesures ρ_1 et ρ_2 définies précédemment peuvent être utilisées pour obtenir deux indices d'évaluation avec référence la qualité basés sur la rugosité.

3.2.2 MSDM

En 2006, Lavoué *et al.* [Lavoué *et al.*, 2006] étendent la métrique SSIM (Structural Similarity Index [Wang *et al.*, 2004]), qui met en avant l'hypothèse de la sensibilité du SVH aux changements structurels des images, aux maillages 3D en proposant une nouvelle métrique basée sur la courbure nommée MSDM. L'approche proposée substitue la luminosité des images 2D considérée par la métrique SSIM par la courbure calculée en chaque nœud v avec l'approche de [Cohen-Steiner and Morvan, 2003]. Cette métrique considère deux fenêtres locales 3D x et y définies par l'ensemble des nœuds connectés appartenant à une sphère centrée en un nœud v de rayon r . Les intersections entre la sphère et la surface de maillages sont également intégrées dans la fenêtre locale pour calculer les statistiques (moyenne, écart-type et covariance) reflétant les structures d'un maillage (figure 3.4).

La courbure moyenne μ_x et l'écart type σ_x d'une fenêtre locale x sont définis par :

$$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{v_i \in x} C(v_i) \quad \text{et} \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{v_i \in x} (C(v_i) - \mu_x)^2} \quad (3.10)$$

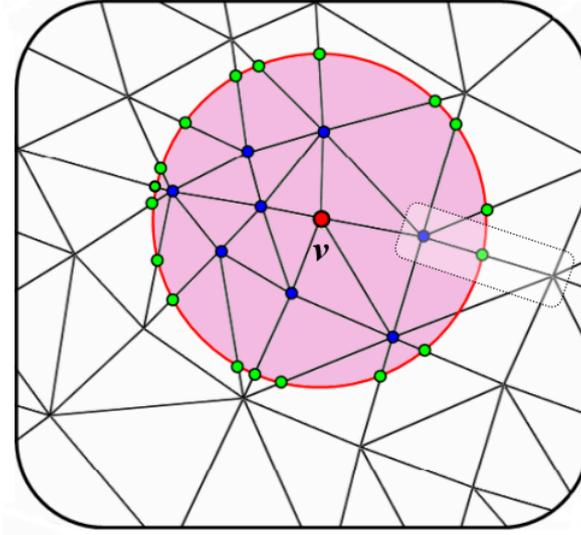


FIGURE 3.4: a) Fenêtre 3D considérée par la métrique MSDM [Lavoué et al., 2006].

où v_i représente le i^{ime} nœud de la fenêtre locale x et n est le nombre de nœuds compris dans celle-ci.

La covariance σ_{xy} est définie par :

$$\sigma_{xy} = \frac{\sigma_{xy}^x + \sigma_{xy}^y}{2} \quad (3.11)$$

avec σ_{xy}^x représentant la covariance basée sur la fenêtre x définie par :

$$\sigma_{xy}^x = 1/n \sum_{v_i \in x} (C(v_i) - v_x)(C(u_i) - v_y) \quad (3.12)$$

où u_i représente le nœud le plus proche (en terme de distance euclidienne) appartenant à la fenêtre y au nœud v_i de la fenêtre x . Ensuite, 3 fonctions de comparaisons sont introduites entre deux fenêtres locales correspondantes x et y appartenant à deux maillages X et Y :

La fonction de comparaison de courbure : $L(x, y) = \frac{||\mu_x - \mu_y||}{\max(\mu_x, \mu_y)}$

La fonction de comparaison de contraste : $C(x, y) = \frac{||\sigma_x - \sigma_y||}{\max(\sigma_x, \sigma_y)}$

La fonction de comparaison de structure : $S(x, y) = \frac{||\sigma_x \sigma_y - \sigma_{xy}||}{\sigma_x \sigma_y}$

Après calcul de ces 3 fonctions, une combinaison de Minkowski est appliquée afin d'obtenir une mesure de distorsion locale entre 2 fenêtres x et y :

$$LMSDM(x, y) = \alpha(L(x, y)^a + \beta C(x, y) + \gamma S(x, y)^a)^{1/a} \quad (3.13)$$

avec $a = 3$, $\alpha = \beta = 0.4$ et $\gamma = 0.2$.

Finalement la mesure de fidélité globale MSDM entre deux maillages X et Y est définie par la somme de Minkowski de leurs mesures de distorsions locales :

$$MSDM(X, Y) = (1/M \sum_{j=1}^M LMSD(x_j, y_j)^a)^{1/a} \in [0, 1[\quad (3.14)$$

avec $a = 0.4$, M représente le nombre de fenêtres locales et x_j, y_j sont les coordonnées du contenu local de la j^{ime} fenêtre 3D.

3.2.3 MSDM2

Dans [Lavoué, 2011], Lavoué propose la métrique MSDM2 en tant qu'amélioration de la métrique MSDM. MSDM2 diffère de sa précédente version par son indépendance face au type de connectivité des maillages d'entrées, par l'aspect multi-échelle dorénavant pris en compte et par les pondérations des fonctions servant à calculer les distorsions locales.

L'approche commence par évaluer un tenseur de courbure [Cohen-Steiner and Morvan, 2003] dans un voisinage sphérique de rayon r autour de chaque nœud sur les deux maillages. Pour cela, un disque géodésique est approximé par l'intersection de la surface avec la sphère centrée en chaque nœud. Ceci permet de rendre le tenseur de courbure estimé plus stable face à la densité d'échantillonnage et au type de connectivité [Alliez et al., 2003]. En variant le rayon du voisinage, le calcul de la courbure est effectué sur différentes échelles $h : r = h/5$.

Dans le cas où le maillage de référence M_r et le maillage dégradé M_d ont des connectivités différentes, une étape de mise en correspondance est nécessaire. Une projection des nœuds du maillage dégradé est effectuée sur la surface du maillage de référence. Puis pour chaque nœud v du maillage dégradé M_d , son nœud le plus proche \hat{v} sur la surface du maillage de référence est calculé :

$$\hat{v} = \arg_{p_i \in M_r} \min \|p_i - v\| \quad (3.15)$$

Ensuite pour chaque nœud \hat{v} appartenant à un triangle $\{v_1^r, v_2^r, v_3^r\}$ sur le maillage de référence, sa courbure $C(\hat{v})$ est interpolée comme suit :

$$C(\hat{v}) = \sum_{j=1}^3 b_j(\hat{v}) \cdot C(v_j^r) \quad (3.16)$$

avec $b_j(\hat{v})_{j=1..3}$ les coordonnées barycentriques de \hat{v} et $C(v_j^r)$ est la courbure du nœud v_j sur la surface du maillage de référence calculée avec la méthode de [Cohen-Steiner and Morvan, 2003]. Ainsi, à chaque nœud v_i du maillage dégradé M_d est associé

un nœud correspondant \hat{v}_i sur la surface du maillage de référence et une valeur de courbure $C(\hat{v}_i)$.

Pour calculer la mesure de distorsion locale, l'approche considère un voisinage sphérique autour de chaque nœud $N(v, h)$ du maillage dégradé M_d et calcule les différences statistiques de courbures entre l'ensemble des nœud du voisinage en question et leurs correspondants sur la surface du maillage de référence. Les fonctions L, C , et S définies dans la métrique MSDM ont été modifiées en ajoutant des pondérations et une normalisation par une gaussienne. Pour chaque nœud de M_d associé à une échelle h , ces fonctions sont définies par :

$$L^h(v) = \frac{||\mu_v^h - \mu_{\hat{v}}^h||}{\max(\mu_v^h, \mu_{\hat{v}}^h) + K} \quad (3.17)$$

$$C^h(v) = \frac{||\sigma_v^h - \sigma_{\hat{v}}^h||}{\max(\sigma_v^h, \sigma_{\hat{v}}^h) + K} \quad (3.18)$$

$$S^h(v) = \frac{||\sigma_v^h \sigma_{\hat{v}}^h - \sigma_{v\hat{v}}^h||}{\sigma_v^h \sigma_{\hat{v}}^h + K} \quad (3.19)$$

où μ_v^h et $\mu_{\hat{v}}^h$ sont respectivement les moyennes de courbures pondérées associées à l'échelle h . Similairement, $\sigma_v^h, \sigma_{\hat{v}}^h$ et $\sigma_{v\hat{v}}^h$ sont les écarts-type et covariance pondérés :

$$\mu_v^h = \sum_{v_i \in N(v, h)} w_v^h(v_i) C(v_i) \quad (3.20)$$

$$\sigma_v^h = \sqrt{\sum_{v_i \in N(v, h)} w_v^h(v_i) (\zeta(v_i) - \mu_v^h)^2} \quad (3.21)$$

$$\sigma_{v\hat{v}}^h = \sqrt{\sum_{v_i \in N(v, h)} w_v^h(v_i) (C(v_i) - \mu_v^h)^2} \quad (3.22)$$

avec w_v^h représentant la fonction de pondération gaussienne centrée en v avec un écart-type de $h/2$ définie par :

$$w_v^h(v_i) = \frac{e^{-||v_i - v||/h^2}}{\sum_{v_j \in N(v, h)} e^{-||v_j - v||/h^2}} \quad (3.23)$$

La mesure de distorsion locale est alors définie en une échelle k pour chaque nœud v du maillage M_d par :

$$LD(v)^h = \frac{\alpha L^h(v) + \beta C^h(v) + \gamma S^h(v)}{\alpha + \beta + \gamma} \quad (3.24)$$

avec $\alpha = \beta = 1$ et $\gamma = 0.5$.

La mesure de distorsion multi-échelle MLD est définie par la moyenne des valeurs mono-échelle :

$$MLD(v) = \frac{\sum_{i=1}^n LD^{h_i}(v)}{n} \quad (3.25)$$

où n est le nombre d'échelles utilisées.

Une fois la carte de distorsions multi-échelle construite, l'approche fourni un score de qualité en utilisant la combinaison de Minkowski sur les valeurs de la carte de distorsions :

$$GMD_{M_d \rightarrow M_r} = (1/|M_d|) \left(\sum_{v \in M_d} MLD(v)^p \right)^{1/p} \quad (3.26)$$

avec $p=3$.

Le score $GMD_{M_r \rightarrow M_d}$ est également calculé pour avoir une métrique symétrique définie par :

$$MSDM2 = \frac{GMD_{M_d \rightarrow M_r} + GMD_{M_r \rightarrow M_d}}{2} \in [0, 1[\quad (3.27)$$

3.2.4 FMPD

Dans [Wang et al., 2012], K. Wang *et al.* proposent une métrique basée sur la rugosité. Deux particularités de la perception humaine sont prises en compte : le masquage visuel (associé à la rugosité de la surface) et la saturation psychométrique (l'incapacité des observateurs humains à différencier les très petits des gros stimuli et leur assignent ainsi des scores similaires).

L'approche commence par calculer la courbure gaussienne discrète définie par :

$$CG_i = |2\pi - \sum_{j \in N_i^F} \alpha_j| \quad (3.28)$$

où N_i^F est l'ensemble des faces incidentes au nœud v_i et α_j représente l'angle entre les deux arêtes incidentes en v_i appartenant à la facette j . Ensuite la matrice représentant le laplacien du maillage est définie par :

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{ij} = \frac{\cot(\hat{\beta}_{i,j}) + \cot(\hat{\beta}'_{i,j})}{2} \quad \text{pour } j \in N_i^V \\ D_{ii} = -\sum_j D_{ij} \end{array} \right\} \quad (3.29)$$

où $\hat{\beta}_{i,j}$ et $\hat{\beta}'_{i,j}$ sont respectivement les deux angles opposés à l'arête $e(v_i, v_j)$ et N_i^V représente l'ensemble des nœuds adjacents au nœud v_i . La rugosité locale est calculée

par la différence pondérée entre GC_i et les courbures gaussiennes des voisins. Les pondérations sont calculées à partir des entrées du laplacien :

$$LR_i = \left| GC_i - \frac{\sum_{j \in N_i^v} D_{ij} \cdot GC_j}{\sum_{j \in N_i^v} D_{ij}} \right| = \left| GC_i - \frac{\sum_{j \in N_i^v} D_{ij} \cdot GC_j}{D_{ii}} \right| \quad (3.30)$$

La deuxième étape consiste en la modulation de la rugosité par une fonction de puissance afin de prendre en compte l'effet du masquage visuel. Pour cela, la dynamique de la rugosité est normalisée en premier lieu dans l'intervalle $[th_l, th_h]$ afin de prendre en compte l'effet de la saturation psychométrique. Ensuite les valeurs de rugosités sont modulées par une fonction de puissance définie par :

$$LRM_i = f(LR_i) = (LR_i)^a - (Th_l)^a \quad (3.31)$$

où a est le paramètre contrôlant l'allure de la fonction.

La troisième étape du pipeline de l'approche permet de réduire l'influence des valeurs supérieures à la moyenne de la rugosité du maillage. La moyenne de la rugosité (avant toute modulation) \overline{LR} est définie par :

$$\overline{LR} = \frac{\sum_i LR_i \cdot s_i}{\sum_i s_i} \quad (3.32)$$

où s_i est égal à un tiers de la superficie totale des facettes incidentes en v_i et $\sum_i s_i$ représente la superficie totale du maillage 3D. Ensuite cette moyenne est modulée $\overline{LRM} = f(\overline{LR})$ afin de spécifier un seuil $Th_{LRM} = \overline{LRM}$ servant à réduire toute rugosité supérieure à ce seuil :

$$LRF_i = Th_{LRM} + b(LRM_i - Th_{LRM}) \quad \text{pour } LRM_i > Th_{LRM} \quad (3.33)$$

où LRF_i représente la rugosité locale finale du nœud v_i et b est un paramètre contrôlant la magnitude de la réduction égal à 0.5. Th_l a été fixé à 5×10^{-4} et $Th_h = \max\{0.2, 5Th_{LRM}\}$.

La rugosité globale GR du maillage de référence M_r est alors définie par :

$$GR = \frac{\sum_i LRF_i \cdot S_i}{\sum_i S_i} \quad (3.34)$$

Finalement, la distance $FMPD_{M_r, M_d}$ entre un maillage de référence et un maillage dégradé est définie par :

$$FMPD = c|GR - GR'| \quad (3.35)$$

où GR et GR' sont respectivement les rugosités globales des maillage M_r et M_d . c est une constante fixée à 0.8.

3.2.5 TPDM

Récemment, F.Torkhani *et al.* [Torkhani et al., 2014] ont proposé une métrique nommée TPDM basée sur la différence des tenseurs de courbure. A la différence de MSDM2, cette métrique considère non seulement les amplitudes du tenseur mais également ses directions principales.

Après une mise en correspondance des nœuds du maillage de référence M_r vers le maillage dégradé M_d , et ainsi l'association de chaque nœud v_i dans M_r à son correspondant v'_i dans M_d (figure 3.5), l'approche commence par une estimation du tenseur de courbure [Cohen-Steiner and Morvan, 2003]. Pour chaque sommet s_i du maillage, le tenseur T (sous forme de matrice) est calculé à partir d'une moyenne sur un disque géodésique B :

$$T(s) = 1/|B| \sum_e \beta(e) |e \cap B| \bar{e} e^{-t} \quad (3.36)$$

où B est l'aire du disque géodésique établi par l'intersection d'une sphère centrée sur le sommet cible de rayon égal à 0.5% de la diagonale de la boîte englobante du maillage, $\beta(e)$ désigne l'angle entre les normales des faces incidentes à l'arête e , $|e \cap B|$ représente la longueur de la portion de e à l'intérieur de B et \bar{e} est le vecteur unitaire dans la direction de e . Les valeurs absolues des valeurs propres non nulles, notées k_{min} et k_{max} , représentent respectivement les courbures minimales et maximales. Les vecteurs propres associés à ces valeurs propres, notés y_{min} et y_{max} représentent les directions de courbure principales de la surface.

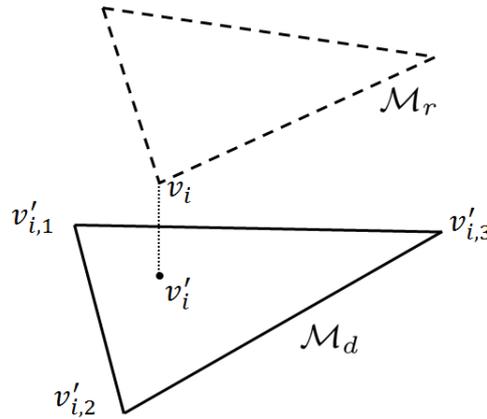


FIGURE 3.5: Projection d'un nœud v_i du maillage de référence M_r sur la surface du maillage dégradé M_d . [Extrait de [Torkhani et al., 2014]].

La deuxième étape permet de calculer une distance locale entre les tenseurs T_{v_i} et $T_{v'_{i,k}}$ ($v'_{i,1}$, $v'_{i,2}$ et $v'_{i,3}$ sont les nœuds de la face contenant la projection du nœud v_i de M_r

dans M_d). En effet pour une direction de courbure minimale γ_{min} de T_{v_i} , une direction principale de courbure γ'_1 de $T_{v_{i,k}}$ ayant la plus petite distance angulaire correspondante lui est associée. En conséquence, k_{min} (l'amplitude de courbure minimale de T_{v_i}) est liée à l'amplitude de courbure k'_1 associée à γ'_1 . Sur le même principe, γ'_2 et k'_2 de $T_{v_{i,k}}$ sont respectivement liés à γ_{max} et k_{max} . La distance entre les tenseurs locaux pour chaque nœud v_i et $v_{i,k}$ est alors définie par :

$$LTD_{v_i, v_{i,k}} = \frac{\Theta_{min}}{\pi/2} \delta_{k_{min}} + \frac{\Theta_{max}}{\pi/2} \delta_{k_{max}} \quad (3.37)$$

où Θ_{min} est l'angle entre γ_{min} et γ'_1 (similairement, Θ_{max} est l'angle entre γ_{max} et γ'_2), et $\delta_{k_{min}}$, $\delta_{k_{max}}$ représentent respectivement le contraste de Michelson [Michelson, 1927] des amplitudes de courbure k_{min} et k_{max} , k'_2 :

$$\delta_{min} = \left| \frac{k_{min} - k'_1}{k_{min} - k'_1 + \varepsilon} \right| \quad \delta_{max} = \left| \frac{k_{max} - k'_2}{k_{max} - k'_2 + \varepsilon} \right| \quad (3.38)$$

Pour prendre en compte l'effet du masquage visuel, les distances locales des tenseurs LTD sont pondérées avec des coefficients de rugosité :

$$LPD_{v_i, v_{i,k}} = RW_i^\gamma \cdot RW_i^k \cdot LTD_{v_i, v_{i,k}} \quad (3.39)$$

où RW_i^γ, RW_i^k sont respectivement les pondérations dérivées des principales directions et amplitudes de courbure dans le voisinage de v_i . RW_i^γ est obtenue par la somme des écarts types de la direction minimale et maximale du tenseur de courbure. Par ailleurs, RW_i^k est calculée par le ratio du laplacien de la moyenne des courbures dans le voisinage de v_i (représentant les variations de la courbure) et la moyenne de la courbure en v_i . Pour les régions isotropiques ($k_{min} = k_{max}$), un coefficient anisotropique est calculé pour déterminer les nœuds appartenant à ces régions :

$$\rho_v = \frac{k_{max}^{v_i} - k_{min}^{v_i}}{k_{max}^{v_i} + k_{min}^{v_i} + e} \quad (3.40)$$

où $k_{min}^{v_i}$ et $k_{max}^{v_i}$ sont respectivement les courbures minimales et maximales en v_i et e est une constante fixée à 5% de la moyenne de courbure de M_r . Les nœuds ayant un coefficient anisotropique inférieur à 0.5 sont considérés comme appartenant à une région isotropique. Les pondérations associées aux nœuds appartenant à cette région sont mises à 1.

La distance perceptuelle locale basée tenseurs $LTPDM$ associée à v_i est alors définie par :

$$LTPDM_{v_i} = \sum_{k=1}^3 b_k(v'_i) LPD_{v_i, v'_{i,k}} \quad (3.41)$$

où $LPD_{v_i, v'_{i,k}}$ est la distance perceptuelle locale entre v_i et le k^{eme} nœud contenant le nœud v'_i résultat de la projection de v_i et $b_k(v'_i)$ est la k^{eme} coordonnée barycentrique de v'_i dans T'_i .

Finalement la distance perceptuelle globale basée sur les tenseurs de courbure TPDM est définie par la somme de Minkowski pondérée :

$$TPDM = \sum_{i=1}^N (w_i |LTPD_{v_i}|^p)^{1/p} \quad (3.42)$$

où $w_i = s_i / \sum_{i=1}^N s_i$ et s_i représente 1/3 de la surface de toutes les faces incidentes en v_i , et $p = 2.5$.

Nous pouvons remarquer que les métriques présentées modélisent principalement une seule caractéristique du système visuel humain : le masquage visuel. Un autre aspect fondamental de notre perception est lié à la saillance visuelle. Cette propriété est essentielle à notre perception dans la mesure où notre regard est attiré par des régions distinctes dans notre environnement ayant un fort potentiel de saillance. A notre connaissance, aucune approche de la littérature n'a intégré cette caractéristique pour évaluer objectivement la qualité perçue d'un maillage 3D. C'est pour cela que nous apportons une contribution, détaillée dans ce qui suit, mettant en oeuvre une nouvelle métrique d'évaluation avec référence de la qualité des maillages 3D basée sur la saillance et sur l'effet du masquage visuel.

3.3 Métrique d'évaluation de la qualité des maillages 3D avec référence basée sur la saillance visuelle

3.3.1 Synopsis

Nous proposons une nouvelle méthode d'évaluation de la qualité perceptuelle basée modèle nommée **SMQI (Saliency Mesh Quality Index)** pour l'évaluation avec référence de la qualité des maillages 3D. Celle-ci est inspirée de la métrique SSIM proposée par Wang *et al.* [Wang *et al.*, 2004] pour les images 2D et de la métrique MSDM [Lavoué *et al.*, 2006]. Cependant, au lieu de calculer les statistiques locales reflétant les informations structurelles sur une carte de courbure similairement à MSDM, nous proposons de générer une carte de saillance sur laquelle nous calculons les statistiques à travers des

voisinages locaux sur les deux maillages. En effet, nous supposons que la qualité perçue du maillage 3D est fortement liée à la modification locale et globale de la saillance associée à la surface du maillage. De plus, pour les deux maillages 3D comparés, nous utilisons une carte de rugosité pour calculer les différences de la moyenne de rugosité sur chaque nœud. Ceci nous permet de prendre en compte le masquage visuel qui peut se produire lorsqu'une région rugueuse est apte à dissimuler une distorsion géométrique. Cette information de rugosité est combinée avec les statistiques calculées sur la carte de saillance pour fournir un score de qualité reflétant la qualité perçue du maillage. La figure 3.6 présente un synopsis de la métrique proposée.

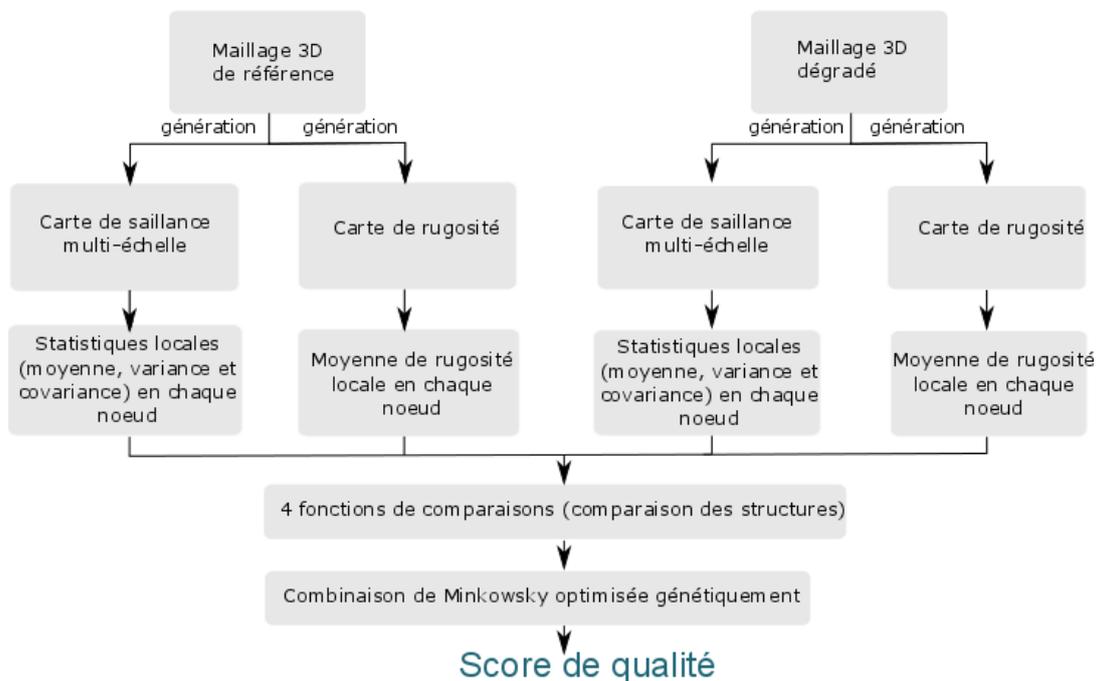


FIGURE 3.6: Synopsis de la métrique

3.3.2 Motivation : La qualité visuelle et la saillance visuelle

L'attention visuelle sélective représente une caractéristique cruciale du SVH. Nous sommes constamment engloutis dans une quantité colossale d'informations ne pouvant être traitées ni en somme ni en détails. Par conséquent, la solution naturelle passe ipso-facto par la sélection de fractions des informations disponibles pour une analyse détaillée alors que le reste de l'information est ignoré.

Comme souligné dans le premier chapitre, ayant un objet 3D, notre attention visuelle est attirée par des régions particulières différentes de leur voisinage dépendantes des propriétés intrinsèques du signal et non du vécu de l'observateur. Ainsi, une distorsion pourrait gêner la perception d'une image si celle-ci est localisée sur une région saillante

où l'attention visuelle est maximale et vice-versa. Ceci a été le constat de deux études dans lesquelles des séries d'expérimentations psychovisuelles ont confirmé qu'une dégradation est davantage perçue lorsqu'elle est située sur une région saillante du contenu [Boulos et al., 2009][Engelke et al., 2010]. Le même résultat peut être constaté sur la figure 3.7. La figure 3.7(a) et la figure 3.7(b) représentent respectivement le maillage 3D de référence et sa carte de saillance multi-échelle. Les figures 3.7(c) et 3.7(d) représentent respectivement la version bruitée sur les zones saillantes et sur les zones très peu saillantes. Nous pouvons facilement remarquer que les distorsions sont plus gênantes lorsqu'elles sont situées sur des régions saillantes (figure 3.7(c)) que lorsqu'elles sont situées sur des régions moins saillantes (figure 3.7(d)). Les métriques constituant la référence dans la littérature *TPDM*, *MSDM2*, et *FMPD* échouent dans ce cas de figure. Ces dernières fournissent un score de qualité élevé pour le maillage dégradé sur les régions très peu saillantes (figure 3.7(d) $TPDM = 0.14$, $FMPD = 0.54$, $MSDM2 = 0.41$) et un score de qualité inférieur pour le maillage bruité sur les zones saillantes (figure 3.7(c) $TPDM = 0.008$, $FMPD = 0.15$, $MSDM2 = 0.36$). Notons que dans le cas de ces métriques, un score de qualité élevé indique une mauvaise qualité et vice-versa. Ce cas de figure montre que les meilleures métriques dans la littérature en terme de corrélation avec la perception humaine échouent dans le cas où les distorsions affectent les régions saillantes (ou peu saillantes) du maillage 3D.

3.3.3 La carte de saillance pour l'extraction des informations structurales du maillage 3D

Afin de calculer les statistiques locales (moyenne, écart-type, et covariance) reflétant les informations structurales d'un maillage 3D, nous utilisons une carte de saillance générée par notre approche présentée dans la premier chapitre. Pour un voisinage local $N(v_i)$ représentant les nœuds adjacents de v_i sur la surface du maillage, nous définissons la moyenne de saillance et l'écart type respectivement notés $\mu_{N(v_i)}$ et $\sigma_{N(v_i)}$ par :

$$\mu_{N(v_i)} = \frac{1}{|N(v_i)|} \sum_{v_j \in N(v_i)} MS(v_j) \quad (3.43)$$

$$\sigma_{N(v_i)} = \sqrt{\frac{1}{|N(v_i)|} \sum_{v_j \in N(v_i)} (MS(v_j) - \mu_{N(v_i)})^2} \quad (3.44)$$

où $MS(v_j)$ représente la saillance multi-échelle du nœud v_j et $|N(v_i)|$ est la cardinalité du voisinage de v_i .

Pour deux voisinages locaux correspondants $N_1(v_i) = N_{\mathcal{M}_1}(v_i)$ et $N_2(v_i) = N_{\mathcal{M}_2}(v_i)$, sur la surface des maillages \mathcal{M}_1 et \mathcal{M}_2 , nous définissons la covariance $\sigma_{N_1(v_i)N_2(v_i)}$ par :

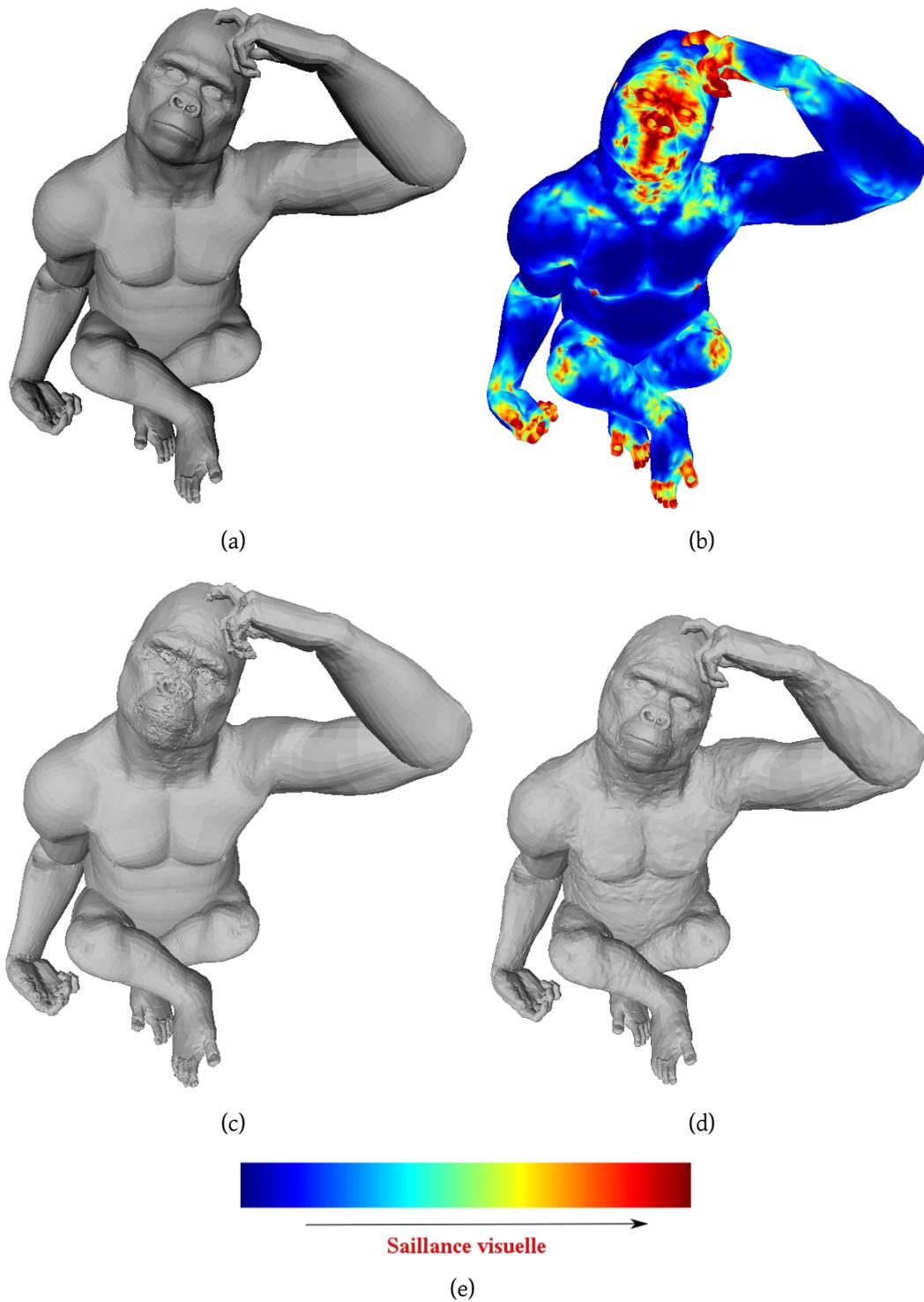


FIGURE 3.7: Comparaison de maillages 3D avec différentes qualités perçues : a) Maillage 3D Gorille de référence, b) carte de saillance multi-échelle de (a), c) maillage 3D Gorille bruité sur les zones saillantes. TPDM=0.008, FMPD=0.15, MSDM2=0.36. (d) maillage 3D Gorille bruité sur des zones peu saillantes. TPDM=0.14, FMPD=0.54, MSDM2=0.414. (Notons qu'un score objectif de qualité important fait référence à une qualité moindre et réciproquement). e) palette de couleurs.

$$\sigma_{N_1(v_i)N_2(v_i)} = \frac{1}{|N_1(v_i)|} \sum_{v_j \in N_1(v_i), N_2(v_i)} (MS_{\mathcal{M}_1}(v_j) - \mu_{N_1(v_i)})(MS_{\mathcal{M}_2}(v_j) - \mu_{N_2(v_i)}) \quad (3.45)$$

où $MS_{\mathcal{M}_1}$ et $MS_{\mathcal{M}_2}$ représentent respectivement les cartes de saillance multi-échelles des deux maillages comparés \mathcal{M}_1 et \mathcal{M}_2 .

Ensuite, à l'instar de [Lavoué et al., 2006], nous définissons 3 fonctions de comparaisons entre deux voisinages correspondants $N_1(v_i)$ et $N_2(v_i)$ pour quantifier la déformation altérant les informations structurelles du maillage 3D dégradé :

$$L(N_1(v_i), N_2(v_i)) = \frac{\|\mu_{N_1(v_i)} - \mu_{N_2(v_i)}\|_2}{\max(\mu_{N_1(v_i)}, \mu_{N_2(v_i)})} \quad (3.46)$$

$$C(N_1(v_i), N_2(v_i)) = \frac{\|\sigma_{N_1(v_i)} - \sigma_{N_2(v_i)}\|_2}{\max(\sigma_{N_1(v_i)}, \sigma_{N_2(v_i)})} \quad (3.47)$$

$$S(N_1(v_i), N_2(v_i)) = \frac{\|\sigma_{N_1(v_i)}\sigma_{N_2(v_i)} - \sigma_{N_1(v_i)N_2(v_i)}\|_2}{\sigma_{N_1(v_i)}\sigma_{N_2(v_i)}} \quad (3.48)$$

où L , C et S font référence respectivement à la comparaison de la saillance, la comparaison du contraste et la comparaison de structure.

3.3.4 La carte de rugosité pour la prise en compte du masquage visuel

Ayant défini les fonctions de comparaisons de saillance, nous avons remarqué que le masquage visuel n'est pas pris en compte convenablement par ces fonctions. En effet, une distorsion sera plus visible sur une région lisse que sur une région rugueuse. Pour obvier à cette faiblesse, nous avons implémenté l'approche de [Wang et al., 2012] qui fournit une carte de rugosité d'un maillage 3D (voir les détails de cette approche dans la section 1.1 *Etat de l'art*). Subséquemment, nous introduisons une quatrième fonction basée sur la comparaison de la moyenne locale de rugosité. Le but de cette fonction est d'induire une large différence lorsqu'une région lisse devient rugueuse. Elle est définie par :

$$R(N_1(v_i), N_2(v_i)) = \frac{\|\delta_{N_1(v_i)} - \delta_{N_2(v_i)}\|_2}{\max(\delta_{N_1(v_i)}, \delta_{N_2(v_i)})} \quad (3.49)$$

où $\delta_{N_1(v_i)} = \frac{1}{|N_1(v_i)|} \sum_{v_j \in N_1(v_i)} LRF(v_j)$ et $LRF(v_j)$ représente la rugosité locale finale du nœud v_j calculé par l'équation 3.33. Il est important de souligner qu'une carte de saillance est différente d'une carte de rugosité dans la mesure où elle ne fait ressortir que les informations nouvelles et non redondantes (voir la figure 3.8).

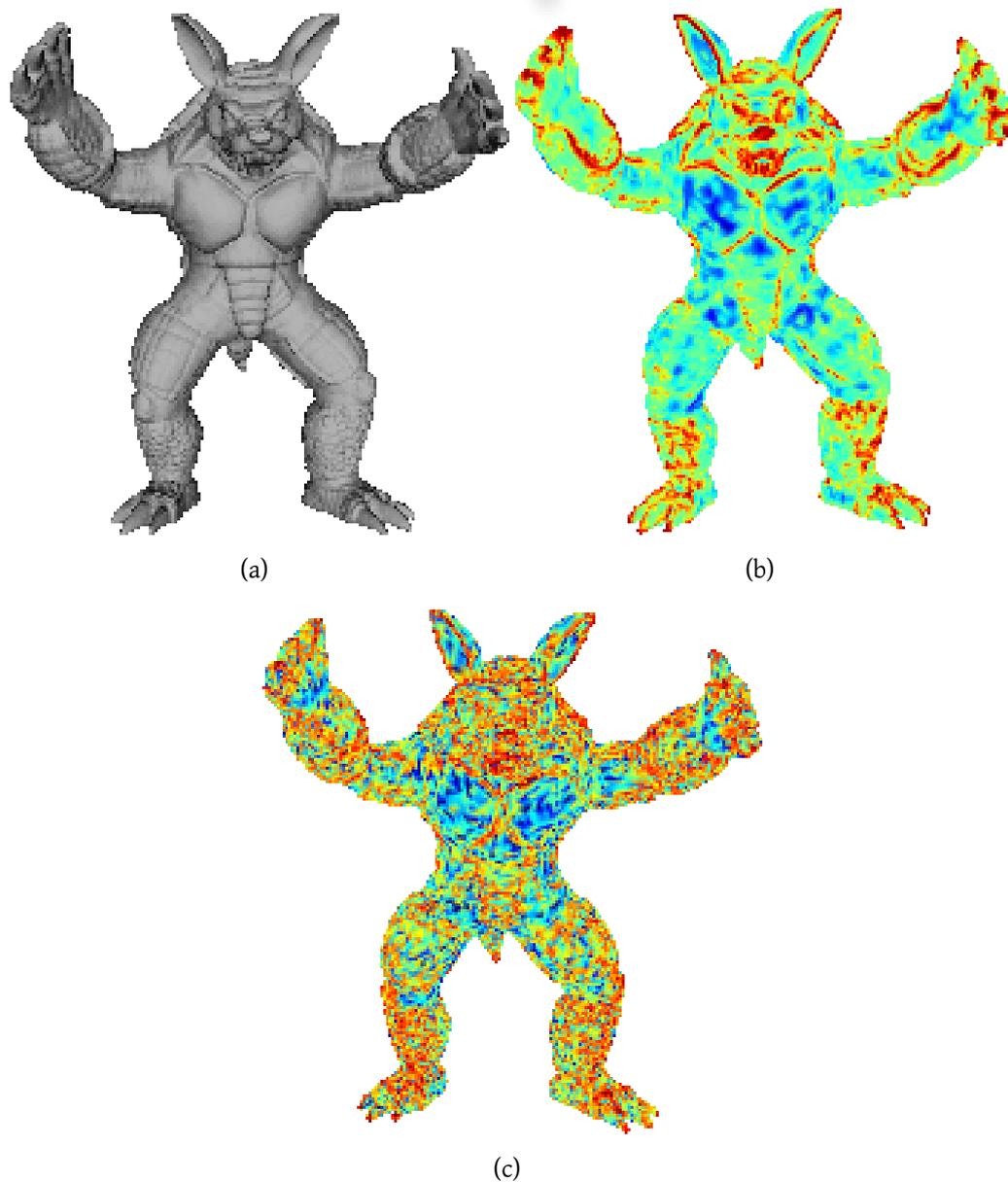


FIGURE 3.8: Différence entre une carte de saillance multi-échelle et une carte de rugosité : a) Maillage 3D Armadillo, b) carte de saillance multi-échelle de (a) et c) carte de rugosité. Notons que les informations nouvelles et non redondantes uniquement sont mises en exergue sur la carte de saillance.

3.3.5 Apprentissage et prédiction du score de qualité

Après avoir défini les quatre fonctions de comparaison, nous expliquons dans cette sous section comment nous combinons les informations extraites des cartes de saillance et de rugosité.

Nous avons choisi une des combinaisons les plus utilisées dans le domaine de l'évaluation de la qualité : la somme de Minkowski. Ainsi, notre mesure de la qualité perçue SMQI entre deux maillages 3D \mathcal{M}_1 et \mathcal{M}_2 est définie par la somme de Minkowski pondérée de leurs distances locales :

$$SMQI(\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2) = \left(\frac{1}{|\mathcal{V}|} \sum_i L(N_1(v_i), N_2(v_i)) \right)^\alpha + \left(\frac{1}{|\mathcal{V}|} \sum_i C(N_1(v_i), N_2(v_i)) \right)^\beta + \left(\frac{1}{|\mathcal{V}|} \sum_i S(N_1(v_i), N_2(v_i)) \right)^\gamma + \left(\frac{1}{|\mathcal{V}|} \sum_i R(N_1(v_i), N_2(v_i)) \right)^\delta \quad (3.50)$$

où les coefficients α , β , γ et δ sont obtenus à partir d'une optimisation basée sur les algorithmes génétiques. En effet, notre distance perceptuelle dépend de quatre paramètres indépendants dont l'optimisation empirique ou manuelle serait difficile et inefficace. Il est important aussi de souligner que le nombre de maillages 3D que contiennent les deux bases de maillages subjectivement évaluées décrites dans la sous-section suivante est très réduit en comparaison avec les bases d'images 2D. Pour faire face à ce problème, nous effectuons un apprentissage *Leave-One-Out* [Kohavi, 1995] sur les corpus. L'objectif est d'effectuer un apprentissage du modèle sur $k - 1$ observations et de le valider sur la k^{eme} . Ce processus est répété $k \times 999$ fois. Dans notre contexte, une observation fait référence aux MOS (*Mean-Opinion-Score*) d'un maillage 3D de référence et de ses versions dégradées. La fonction de fitness utilisée pour effectuer l'optimisation génétique est définie par :

$$f(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = \sqrt{\sum_{i=0}^{k-1} (MOS_i - SMQI_i(\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2))^2} \quad (3.51)$$

où MOS_i est le vecteur des valeurs MOS relatives à l'observation i . Après l'optimisation génétique, nous obtenons : $\alpha = 23.63$, $\beta = 3.26$, $\gamma = 5.04$ et $\delta = 0.77$. Les valeurs de ces paramètres ont été fixées pour toutes les évaluations de la qualité avec référence dans ce travail de thèse.

3.3.6 Résultats et analyse

3.3.6.1 Bases de maillages 3D et scores subjectifs de la qualité

Afin de comparer notre métrique d'évaluation de la qualité avec les méthodes de l'état de l'art, nous avons utilisé deux bases de maillages 3D disponibles évaluées subjectivement : 1) Liris/Epfl General-Purpose Database [Lavoué et al., 2006] et 2) Liris-Masking [Lavoué, 2009]. La première base de maillages comprend quatre maillages 3D de référence. Ces maillages sont dégradés par deux types de distorsions : le bruit additif et le lissage. Ces distorsions sont appliquées suivant trois degrés d'intensités sur différentes régions du maillage : 1) uniformément sur la surface du maillage, 2) spécifiquement sur les zones rugueuses ou lisses du maillage, et 3) sur les zones de transitions entre les régions rugueuses et les régions lisses. Au total, 22 maillages dégradés de chaque maillage de référence sont générés et évalués par 12 observateurs humains. La figure 3.9 montre quelques maillages 3D de la base Liris/Epfl General-Purpose avec leurs valeurs MOS normalisées.

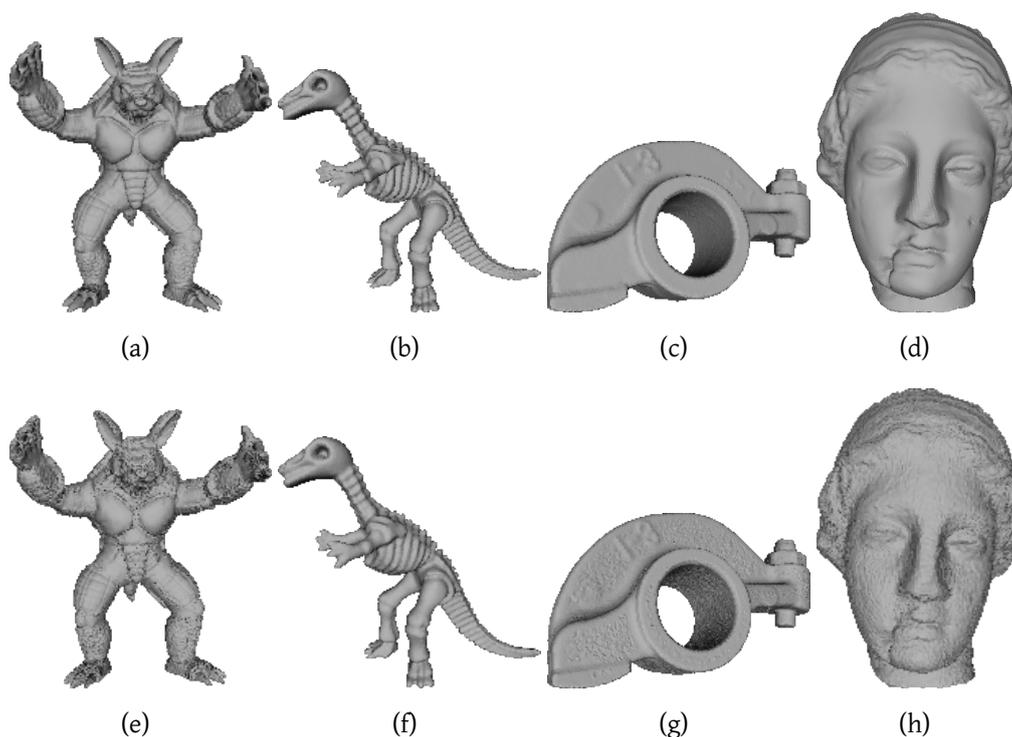


FIGURE 3.9: Exemples de maillages 3D appartenant à la base Liris/Epfl General-Purpose. Sur la première ligne figurent les quatre maillages de référence. Dans la seconde figurent quatre versions dégradées désignant de gauche à droite : maillage Armadillo bruité sur les zones rugueuses (MOS=0.84), maillage Dinosaur lissé uniformément (MOS=0.43), maillage RockerArm bruité sur les zones lisses (MOS=0.75) et maillage Venus bruité uniformément (MOS=1).

3.3. Métrique d'évaluation de la qualité des maillages 3D avec référence basée sur la saillance visuelle

La seconde base Liris-Masking consiste en quatre maillages de référence affectés par du bruit additif uniquement suivant trois degrés d'intensités sur les régions lisses ou rugueuses du maillage. Six versions dégradées sont générées pour chaque maillage de référence. Douze observateurs humains ont évalué la qualité des maillages. Nous présentons quelques maillages 3D de la base Liris-Masking sur la figure 3.10 avec leurs valeurs MOS normalisées.

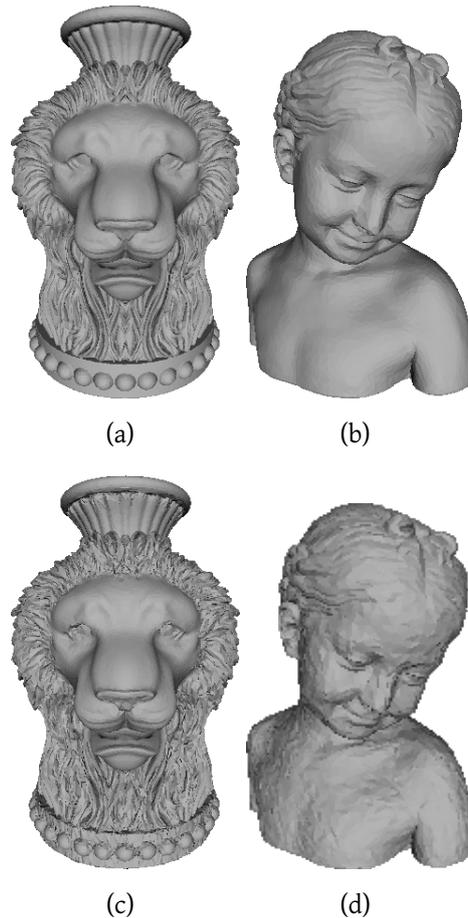


FIGURE 3.10: Exemples de maillages 3D appartenant à la base Liris-Masking. Dans la première ligne figurent 2 maillages de référence. Dans la seconde figurent 2 versions dégradées désignant de gauche à droite : maillage 3D Lion bruité sur les zones rugueuse (MOS=0.20), maillage 3D Bimba bruité sur les zones lisses (MOS=1.0).

3.3.6.2 Performance et comparaison avec l'état de l'art

Pour évaluer la performance de notre métrique de qualité, nous calculons le coefficient de corrélation de Spearman (SROOC : Spearman Rank Ordered cORrelation Coefficient) entre les scores de qualité subjectifs des observateurs humains et les scores de qualités objectifs fournis par notre mesure de qualité. Couramment employé, ce terme cor-

relation est utilisé pour désigner la liaison ou la relation entre 2 variables quelconques. En statistique, ce terme sert à quantifier la liaison entre 2 variables quantitatives. Cette jonction peut être soit symétrique (possibilité de permuter les variables quantitatives x et y) ou asymétrique (l'une des valeurs dépend de l'autre, et donc impossible de permuter les variables quantitatives x et y).

Cette méthode a la particularité de ne pas utiliser les valeurs des observations mais leurs rangs. Le coefficient de corrélation de Spearman est compris entre 1 et -1 :

1 : forte corrélation positive.

0 : absence de corrélation.

-1 : forte corrélation négative.

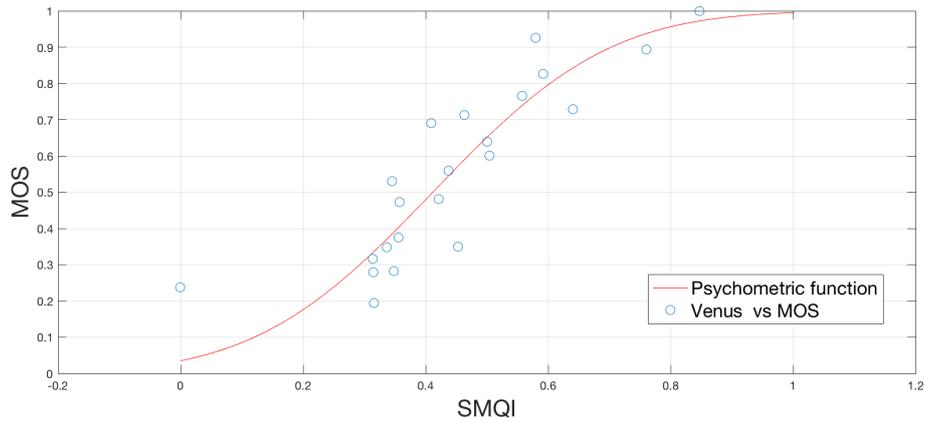
La table 3.1 présente les performances de notre métrique ainsi que les métriques de l'état de l'art en terme de corrélation de Spearman avec les scores subjectifs fournis par la base Liris/Epfl General Purpose. Nous pouvons remarquer que notre métrique *SMQI* produit d'importantes valeurs de corrélation pour tous les maillages 3D et plus particulièrement pour le maillage Venus où les valeurs de corrélations sont les plus élevées. Le résultat de la régression psychométrique entre les scores objectifs et subjectifs est présenté sur la figure 3.11(a) et confirme ce résultat pour le maillage 3D Venus. La fonction choisie dans notre étude est la fonction cumulative de la loi normale gaussienne [Engeldrum, 2000] :

$$g(m, n, R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{m+nR}^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (3.52)$$

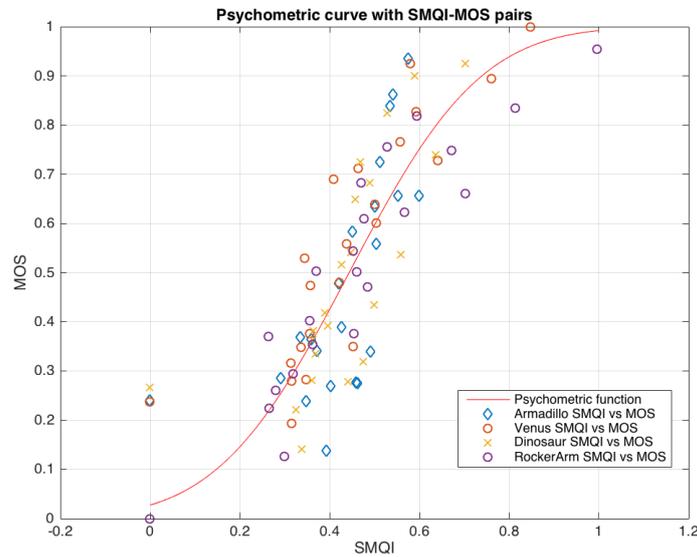
où m et n sont estimés avec une régression non-linéaire par la méthode des moindres carrés et R représente le score objectif. De plus, il apparait que la métrique *SMQI* est classée deuxième meilleure métrique derrière *TPDM* en ce qui concerne la corrélation sur toute la base de maillages (les valeurs de corrélations sont 89.6% pour *TPDM*, 84.6% pour *SMQI* et 80.4% pour *FMPD*). Cette corrélation importante associée à la base Liris/EPFL General-Purpose peut être confirmée par la courbe présentée sur la figure 3.11(b) où les points *SMQI* – *MOS* sont très proches de la courbe psychométrique. Cette courbe indique aussi une forte capacité de généralisation sur tous les maillages 3D.

Nous avons également testé et comparé notre métrique avec les métriques de l'état de l'art sur la base de maillages Liris-Masking. La table 3.2 présente les valeurs de corrélation de Spearman des différentes métriques sur cette base de maillages. À partir de ces résultats, trois observations peuvent être formulées. La première est que *SMQI* est très compétitive avec *TPDM* et *MSDM2* et réussit à prendre en compte le masquage

3.3. Métrique d'évaluation de la qualité des maillages 3D avec référence basée sur la saillance visuelle



(a)



(b)

FIGURE 3.11: Fonction de régression psychométrique tracée pour les paires SMQI-MOS appliquée sur les maillages de référence et les maillages dégradés du corpus Liris/Epfl General-purpose : (a) maillage 3D Venus et (b) corpus intégral.

Liris/Epfl General-Purpose	HD	RMS	3DWPM1	3DWPM2	MSDM2	FMPD	TPDM	SMQI
Armadillo	69.5	62.7	65.8	74.1	81.6	75.4	84.9	77.5
Venus	1.6	90.1	71.6	34.8	89.3	87.5	90.6	91.6
Dinosaure	30.9	0.3	62.7	52.4	85.9	89.6	92.2	84.8
RockerArm	18.1	7.3	87.5	37.8	89.6	88.8	92.2	91.8
Base entière	13.8	26.8	69.3	49.0	80.4	81.9	89.6	84.6

TABLE 3.1: Valeurs de corrélation de Spearman (%) des différentes métriques sur la base de maillages Liris/Epfl General Purpose database

Liris Masking	HD[2][3]	RMS[2][3]	3DWPM1	3DWPM2	MSDM2	FMPD	TPDM	SMQI
Armadillo	48.6	65.7	58.0	48.6	88.6	88.6	88.6	88.6
Lion-vase	71.4	71.4	20.0	38.3	94.3	94.3	82.9	83.0
Bimba	25.7	71.4	20.0	37.1	100.0	100.0	100.0	100.0
Dinosaure	48.6	71.4	66.7	71.4	100.0	94.3	100.0	100.0

TABLE 3.2: Valeurs de corrélation de Spearman (%) des différentes métriques sur la base de maillages Liris-Masking

visuel. La deuxième observation concerne la légère infériorité de la valeur de corrélation de Spearman associée au maillage 3D Lion en comparaison avec les valeurs de corrélations de *FMPD* et *MSDM2*. Ceci pourrait être expliqué par le fait que la carte de saillance multi-échelle du maillage dégradé sur laquelle sont calculées les statistiques locales ne reflète pas convenablement les zones saillantes dégradées. En effet, le maillage de référence et le maillage dégradé utilisent le même rayon (défini empiriquement) des voisinages sphériques lors du calcul des patches locaux adaptatifs pour l'estimation de la carte de saillance multi-échelle. Nous pensons qu'une méthode automatique définissant un rayon propre à chaque maillage mènera à une meilleure estimation de la carte de saillance pour le maillage dégradé. Ceci constitue une de nos perspectives. La troisième observation se rapporte aux valeurs de corrélation sur tout le corpus de la base Liris-Masking. Nous ne présentons pas les résultats de corrélation sur tout le corpus car comme confirmé dans [Lavoué and Corsini, 2010], le protocole utilisé lors des évaluations subjectives spécifiait un référentiel d'évaluation différent pour chaque maillage et par conséquent les valeurs de corrélation sur tout le corpus des maillages 3D ne sont pas significatives.

A partir des résultats et comparaisons précédents, il apparaît que la métrique *SMQI* est fortement corrélée à la perception humaine en raison de l'intégration de la saillance et du masquage visuel à la fois. En sus, *SMQI* est classée deuxième en terme de corrélation sur la base Liris/Epfl General-Purpose et est concurrentielle sur la base Liris-Masking. Par ailleurs, dans le cas de figure présenté sur la figure 3.7, notre méthode proposée réussit dans l'évaluation de la qualité d'une manière similaire à la perception humaine (figure 3.7 (d) $SMQI = 0.41$ et figure 3.7 (c) $SMQI = 0.49$). Deux questions intéressantes doivent être posées après que nous ayons présenté sur la figure 3.7 les limitations des trois métriques de référence de l'état de l'art lors de l'évaluation de la qualité d'un maillage dégradé sur les zones perceptuellement importantes : 1) Est ce que les performances des métriques de l'état de l'art en terme de corrélation avec la perception humaine resteront les mêmes lorsqu'elles seront appliquées à un corpus de maillages dégradés sur les régions perceptuellement importantes (ou régions perceptuellement

moins importantes)? 2) Est ce que les futures bases de maillages évaluées subjectivement ne devraient pas prendre en compte de nouvelles distorsions ciblant plus particulièrement les zones visuellement saillantes ?

Nous pensons que ces questions sont essentielles pour le développement des métriques corrélées à la perception. Elles seront traitées dans nos futurs travaux.

3.4 Conclusion et perspectives

Nous avons proposé une nouvelle métrique indépendante de la vue, appelée SMQI, pour l'évaluation de la qualité perçue avec référence des maillages 3D non colorés. Cette métrique compare les informations structurelles d'un maillage de référence et d'un maillage dégradé. Pour cela, nous utilisons une carte de saillance multi-échelle sur laquelle nous calculons les statistiques locales reflétant les structures du maillage. Dans le but de prendre en compte l'effet du masquage visuel, une carte de rugosité est calculée pour mesurer les différences des moyennes de rugosité. Par conséquent, nous combinons quatre fonctions de comparaisons en utilisant la somme de Minkowski pondérée afin de fournir un score quantifiant la similarité visuelle entre deux maillages. Les résultats expérimentaux ainsi que les comparaisons avec les méthodes de l'état de l'art ont montré la forte corrélation de notre approche avec les scores de qualité fournis par les observateurs humains et attesté de sa forte compétitivité.

Néanmoins, comme expliqué dans l'analyse des résultats de corrélation sur la base Liris/Epfl General-Purpose, un rayon automatique - servant à définir un voisinage sphérique lors du calcul des patches locaux adaptatifs - propre à la géométrie du maillage mènerait certainement à de meilleurs taux de corrélation.

La métrique proposée ne permet pas d'évaluer la fidélité d'un maillage dégradé ayant une connectivité différente du maillage de référence (le cas d'un maillage simplifié par exemple). Une amélioration consisterait à ajouter une étape de mise en correspondance des nœuds du maillage dégradé vers la surface du maillage de référence.

La sensibilité aux modifications des fréquences du maillages devrait être prise en compte étant donné que les distorsions sont plus visibles sur les hautes fréquences que sur les basses fréquences [Torkhani, 2011]. Une première piste proposée dans [Corsini et al., 2013] suggère d'obtenir les fréquences du maillages à partir des vecteurs propres de la matrice du laplacien et d'associer ces dernières aux fréquences perçues par le SVH. Ainsi les modifications des composantes spectrales du maillage seront liées à la sensibilité aux fréquences du SVH.

La taille des bases de maillages évaluées subjectivement joue également un rôle dans la performance des métriques intégrant une étape d'apprentissage dans leur pipeline. Les bases de maillages existantes ont une taille relativement réduite pour mettre en

œuvre une métrique capable d'évaluer n'importe quel type de distorsion [Lavoué et al., 2006][Lavoué, 2009][Silva et al., 2009]. Pour cela, nous envisageons de mener une campagne d'évaluation subjective de la qualité sur la base de maillages construite dans le cadre de cette thèse en ne considérant que les coordonnées 3D des maillages (*i.e.*, maillages non colorés).

Chapitre 4

Métrieque d'évaluation sans référence de la qualité des maillages 3D non colorés

Dans ce chapitre nous présentons notre métrieque d'évaluation sans référence de la qualité des maillages 3D, puis nous analysons et comparons ses performances avec les métrieques d'évaluation avec référence issues de la littérature.



4.1 Introduction

Dans la majorité des applications manipulant les maillages 3D, la version de référence du maillage est indisponible ce qui rend l'évaluation de la qualité du contenu plus difficile. Cette capacité d'évaluation de la qualité sans recourir à la version de référence est une tâche relativement aisée pour les êtres humains contrairement aux machines et algorithmes pour qui cela est loin d'être le cas. Plusieurs métrieques d'évaluation de la qualité des maillages 3D corrélées à la perception ont été proposées dans la littérature, cependant elles restent limitées par leur dépendance à la version de référence du maillage à évaluer. Pour résoudre cette problématique, nous proposons une méthode d'évaluation de la qualité sans référence appelée **BSMQI Blind Saliency-based Mesh Quality Assessment Index** permettant d'évaluer la qualité perçue d'un maillage dégradé sans pour autant avoir accès à sa version de référence. Etant donné un maillage 3D dégradé, la métrieque proposée est capable d'évaluer la qualité d'un maillage sans avoir recours à sa version de référence à l'instar des êtres humains. Aucune supposition sur le type de distorsion à évaluer n'est nécessaire pour cette métrieque, ce qui la rend utilisable dans n'importe quel contexte nécessitant l'évaluation de la qualité des maillages 3D.

4.2 Approche proposée

4.2.1 Principe

Un des principaux défis à relever lors de la conception d'une métrique de qualité sans référence est de sélectionner les attributs qui sont en mesure de quantifier la déformation structurelle qu'un maillage 3D peut subir et qui soient corrélés à la perception humaine. La saillance visuelle, comme nous l'avons vu, est une caractéristique importante pour le système visuel humain. Son utilité dans des applications de l'informatique graphique citées dans le premier chapitre a prouvé sans aucun doute sa forte implication dans la perception humaine. Similairement, les variations de la rugosité des maillages 3D semblent également influencer la perception visuelle humaine [Torkhani et al., 2014][Wang et al., 2012][Corsini et al., 2007]. En effet une carte de rugosité décèle les régions à fort potentiel de masquage visuel. Ainsi, nous utilisons une carte de saillance multi-échelle et une carte de rugosité et montrons que leurs variations locales permettent d'évaluer la qualité d'un maillage 3D sans se référer à sa version réputée parfaite.

4.2.2 Méthode

Etant donné un maillage 3D dégradé, nous commençons par générer une carte de saillance multi-échelle avec notre méthode présentée dans le chapitre 1 et une carte de rugosité avec la méthode de [Wang et al., 2012] présentée dans le chapitre 3. Ensuite, nous segmentons le maillage 3D en un nombre de superfacettes N_{SF} avec la méthode de [Simari et al., 2014]. Dans notre contexte, ces superfacettes jouent le rôle de patchs locaux sur la surface du maillage (le SVH analyse un contenu localement). Une fois la segmentation effectuée, nous affectons à chaque nœud v_i d'une superfacette SF_j ses valeurs de saillance $MS(v_i)$ (cf. equation 1.13) et de rugosité respectives $LRF(v_i)$ (c.f., équation 3.33). Nous construisons par la suite un vecteur de caractéristiques composé de quatre attributs pour chaque superfacette SF_j :

$$\phi_j = [\mu_{SF_j}, \sigma_{SF_j}, \delta_{SF_j}, \gamma_{SF_j}] \text{ avec } j \in [1, N_{SF}]. \quad (4.1)$$

où μ_{SF_j} , et σ_{SF_j} représentent respectivement la moyenne et l'écart-type de la saillance de la superfacette SF_j définis par :

$$\mu_{SF_j} = \frac{1}{|SF_j|} \sum_{v_i \in SF_j} MS(v_i) \quad (4.2)$$

$$\sigma_{SF_j} = \sqrt{\frac{1}{|SF_j|} \sum_{v_i \in SF_j} (MS(v_i) - \mu_{SF_j})^2} \quad (4.3)$$

où $|SF_{SF_j}|$ représente la cardinalité (*i.e.*, l'ensemble des nœuds) de la superfacette SF_j . δ_{SF_j} et γ_{SF_j} font référence respectivement à la moyenne et à l'écart type de la rugosité de la superfacette SF_j définis par :

$$\delta_{SF_j} = \frac{1}{|SF_j|} \sum_{v_i \in SF_j} LRF(v_i) \quad (4.4)$$

$$\gamma_{SF_j} = \sqrt{\frac{1}{|SF_j|} \sum_{v_i \in SF_j} (LRF(v_i) - \delta_{SF_j})^2} \quad (4.5)$$

Finalement nous effectuons un apprentissage en utilisant le vecteur de caractéristiques. Ceci est effectué par l'intermédiaire des SVM (Support Vector Machine) dans un contexte de régression connu sous le terme SVR (Support Vector Regression) [Vapnik, 1995] qui est utilisé également pour la prédire un score de qualité final. La figure 4.1 présente un synopsis de la méthode.

4.2.3 Segmentation, apprentissage et regression

4.2.3.1 Segmentation du maillage en superfacettes

Une des nouveautés de l'approche proposée s'inscrit dans l'utilisation des superfacettes - résultats d'une sur-segmentation de la surface du maillage en régions dont les frontières sont en accord avec les entités sémantiques du contenu cible - dans le pipeline d'une métrique d'évaluation de la qualité perçue. Pour cela, nous avons modifié la méthode proposée par [Simari et al., 2014] qui pour un maillage \mathcal{M} et un nombre de superfacettes souhaité, exécute les étapes suivantes basées sur le principe du *farthest point* :

Initialisation : L'approche commence par associer le centre relatif à la première superfacette (ou région) au triangle dont le centroïde est le plus proche du centroïde global du maillage. Ensuite chaque centre d'une nouvelle superfacette est affilié au triangle dont la distance euclidienne au dernier triangle considéré est maximale.

Mise à jour des centres : Après que les triangles du maillage aient été affiliés à des régions différentes, il est alors nécessaire de calculer le nouveau centre de chacune des régions. Pour cela, l'approche calcule la superficie-moyenne de tous les triangles appartenant à une région donnée, et associe ainsi le nouveau centre au triangle dont la superficie est la plus proche de la superficie moyenne calculée. Si le nouveau centre désigné est différent du centre antérieur, l'algorithme s'arrête. Sinon, l'étape de la classification est exécutée.

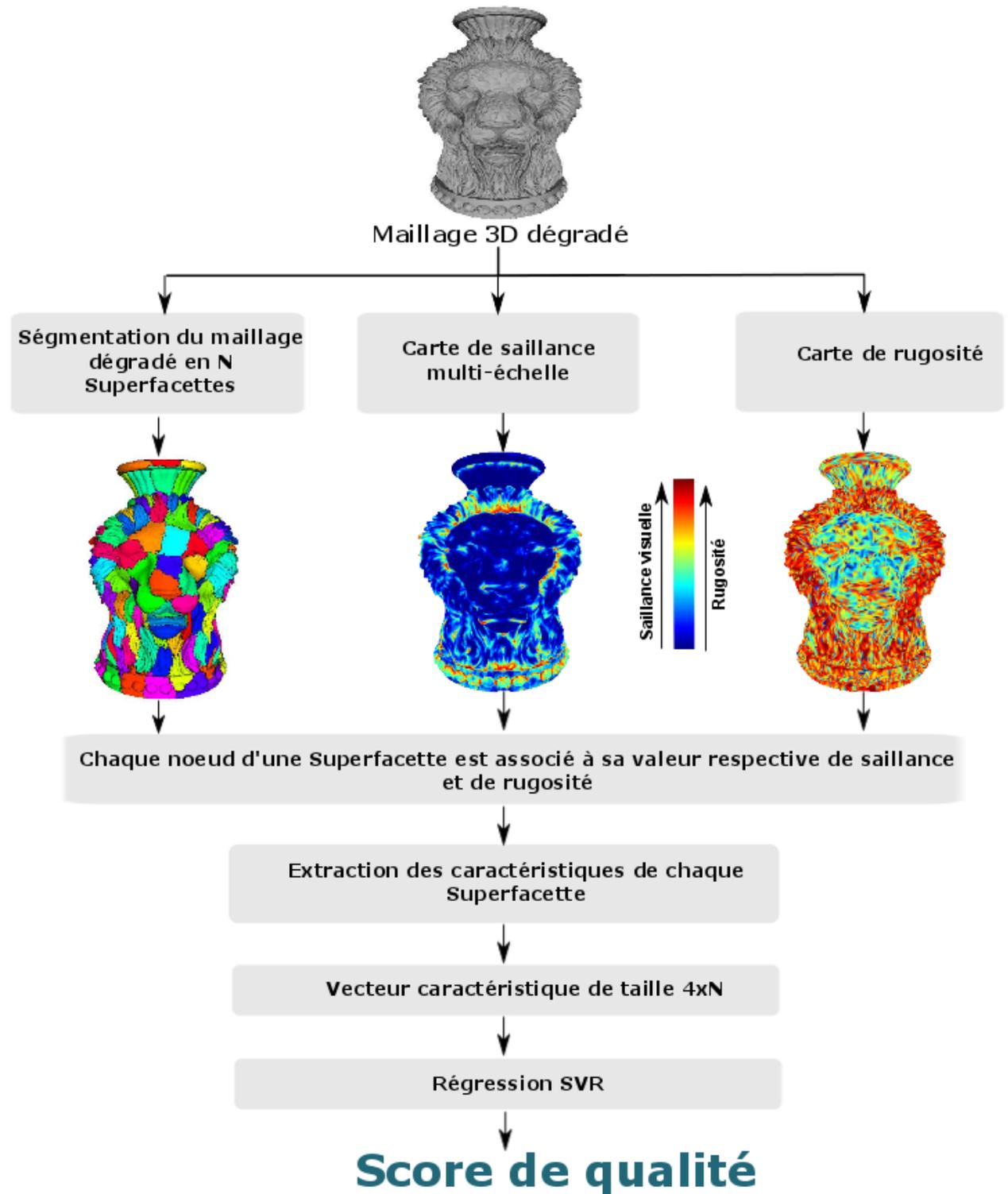


FIGURE 4.1: Synopsis de la métrique sans référence proposée BSMQI.

Classification : Pour chaque triangle, l'approche calcule les distances des plus courts chemins en utilisant l'algorithme de Dijkstra sur le graphe du maillage entre les centres des régions déjà définis et les triangles du maillage. A chaque fois qu'un triangle est considéré lors du calcul du plus court chemin à partir d'un centre d'une région donnée et si la distance calculée est inférieure à la distance antérieure stockée (obtenue à partir de l'étape d'initialisation ou à partir d'une expansion débütée d'un centre différent), alors la distance et le label liés audit triangle sont mis à jour (la surfacette du triangle est fixée).

Les pondérations des arêtes délimitant deux faces f_i et f_j adjacentes du maillage $w(f_i, f_j)$ sont définies en calculant une pondération associée à un poids géodésique $geo(f_i, f_j)$:

Poids géodésique : étant donné deux faces adjacentes f_i et f_j partageant une arête $e_{i,j}$ avec un point médian $m_{i,j}$ et deux centroïdes respectifs c_i et c_j , le poids géodésique est défini par $geo(f_i, f_j) = \|c_i - m_{i,j}\| + \|m_{i,j} - c_j\|$. Ce poids a pour objectif de favoriser les surfacettes compactes et bien formées et est affecté au poids $w(f_i, f_j)$ de l'arête $e_{i,j}$:

$$w(f_i, f_j) = \frac{geo(f_i, f_j)}{d} \quad (4.6)$$

où d est la longueur de la diagonale de la boîte englobante du maillage.

Dans toutes les expérimentations qui suivent, les maillages ont été segmentés en 450 patches.

4.2.3.2 Apprentissage et régression

Même s'il n'est pas de coutume qu'un observateur humain associe un score scalaire à la qualité d'une image mais plutôt procède par une classification de la qualité en fonction de la sensation perçue (par exemple : bonne qualité ou mauvaise qualité), le contexte des applications des métriques nous oblige néanmoins à fournir un scalaire unique traduisant la qualité perçue. Pour cela, nous utilisons l'extension des SVM à la régression appelée SVR [Vapnik, 1995]. L'objectif consiste à estimer une fonction f qui présente au plus une déviation maximale ε traduisant la dépendance entre un exemple x_i et la classe d'affiliation y_i .

Ainsi pour un vecteur de caractéristiques x_i d'un maillage dégradé M_i avec un score de qualité subjectif y_i , la fonction de régression d'une observation x à classifier est donnée par :

$$f_{SVR} = \sum_{x_i \in V_S} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \quad (4.7)$$

où V_S sont les vecteurs de supports, (x_i, y_i) est l'ensemble d'apprentissage, α est le coefficient de Lagrange obtenu à partir d'un processus de minimisation et $K(x_i, x)$ représente le noyau *RBF* (Radial Basis Function) choisi et défini par :

$$K(x_i, x_j) = \exp(\gamma \|x_i - x_j\|^2) \quad (4.8)$$

En effet, la fonction *RBF* est très utilisée comme fonction noyau à cause de son fonctionnement similaire à une mesure de similarité entre deux exemples à classifier. Les motivations relatives à l'utilisation des SVR sont :

- ① La solution en régression intègre un nombre réduit d'exemples x_i (rapidité et efficacité en terme d'apprentissage et de prédiction).
- ② Les résultats de la régression dépendent du noyau utilisé. Tester plusieurs noyaux serait bénéfique dans la mesure où la sélection d'un noyau devrait dépendre du taux de corrélation entre les scores fournis par la régression et les scores subjectifs *MOS*.

De manière à évaluer les performances du schéma proposé et similairement à la métrique avec référence proposée précédemment (*SMQI*), nous utilisons les deux bases Liris-Masking [Lavoué, 2009] et Liris/Epfl General-Purpose [Lavoué et al., 2006]. Nous commençons par effectuer un apprentissage sur la base Liris-Masking pour déterminer les paramètres du noyau (γ et C lequel représente le paramètre de pénalité de l'erreur) avec une méthode de validation croisée à quatre parties. Chacune des parties représente les versions dégradées d'un des quatre maillages de référence associées à leurs score de qualité subjectifs. La régression basée sur les SVR est effectuée en utilisant la librairie *LIBSVM* [Chang and Lin, 2011]. Les paramètres du noyau *RBF* sélectionnés pour la base Liris-Masking sont : $\gamma = 0.002$ et $C = 32$. Pour la base Liris/Epfl General-Purpose, les paramètres sélectionnés sont définis par : $\gamma = 0.005$ et $C = 2$.

4.2.4 Résultats et analyse

4.2.4.1 Performance et comparaison avec l'état de l'art

Le tableau 4.1 présente les valeurs de corrélation de Spearman (SROOC) de notre métrique ainsi que les valeurs de sept métriques avec référence issues de la littérature sur la base Liris-Masking. Nous pouvons remarquer que notre approche produit d'importantes valeurs de corrélation pour tous les maillages 3D sans qu'il soit nécessaire d'accéder à leurs versions de référence contrairement aux métriques d'évaluation avec référence de la qualité. Ces résultats prouvent également que notre métrique réussit largement à prendre en compte l'effet du masquage du visuel.

Base de maillages	Avec référence								Sans référence
Liris Masking	HD	RMS	3DWPM1	3DWPM2	MSDM2	FMPD	TPDM	SMQI	BSMQI
Armadillo	48.6	65.7	58.0	48.6	88.6	88.6	88.6	88.6	94.3
Lion-vase	71.4	71.4	20.0	38.3	94.3	94.3	82.9	83.0	94.3
Bimba	25.7	71.4	20.0	37.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Dinosaure	48.6	71.4	66.7	71.4	100.0	94.3	100.0	100	83.0

TABLE 4.1: Valeurs de corrélation de Spearman (%) des différentes métriques sur la base de maillages Liris-Masking

Base de maillages	Avec référence								Sans référence
Liris/Epfl G.-Purpose	HD	RMS	3DWPM1	3DWPM2	MSDM2	FMPD	TPDM	SMQI	BSMQI
Armadillo	69.5	62.7	65.8	74.1	81.6	75.4	84.9	77.5	20.1
Venus	1.6	90.1	71.6	34.8	89.3	87.5	90.6	91.6	88.9
Dinosaure	30.9	0.3	62.7	52.4	85.9	89.6	92.2	84.4	83.5
RockerArm	18.1	7.3	87.5	37.8	89.6	88.8	92.2	91.8	92.7
Base entière	13.8	26.8	69.3	49.0	80.4	81.9	89.6	84.6	78.1

TABLE 4.2: Valeurs de corrélation de Spearman (%) des différentes métriques sur la base de maillages Liris/Epfl General Purpose.

Le tableau 4.2 présente les valeurs de corrélation de notre approche associées à la base Liris/Epfl General-Purpose. Nous remarquons que les performances de notre approche sur cette base sont moins importantes que celles associées à la base de maillages précédente. En effet, dans la base considérée, les distorsions (le bruit additif et le lissage) sont appliquées sur quatre régions distinctes de la surface du maillage (zones uniformes, zones rugueuses, zones non rugueuses et les zones de transition). Ceci a pour objectif de refléter les distorsions relatives aux traitements les plus communs opérés sur les maillages 3D comme la simplification, la compression et le tatouage [Lavoué et al., 2006]. À partir des résultats du tableau 4.2, il semblerait que notre approche évalue la qualité d'un maillage dégradé affecté par plusieurs types de distorsions avec moins de précision que lorsqu'il est dégradé avec un seul type de distorsions, même si la valeur de corrélation associée au groupe de maillages RockerArm est supérieure à celles des métriques de l'état de l'art. Concernant la valeur de corrélation du groupe de maillages Armadillo, celle-ci est basse en comparaison avec les valeurs de corrélation associées aux autres maillages. L'explication pouvant être avancée est que la carte de saillance générée pour les maillages du groupe Armadillo ne reflèterait pas adéquatement les zones saillantes dégradées. Par conséquent les scores objectifs de qualité ne concorderaient pas avec les scores subjectifs des êtres humains. Le nombre de superfacettes et leur taille sont deux

paramètres pouvant influencer sur la performance de la métrique. Une définition plus précise de ces derniers pourrait améliorer les résultats. Enfin, en considérant l'intégralité du corpus de la base de maillages Liris/Epfl General Purpose, notre métrique obtient un score de corrélation relativement bas en comparaison avec les métriques d'évaluation avec référence de qualité de l'état de l'art. Ceci est d'une part lié au score de corrélation bas associé au groupe de maillages Armadillo et d'autre part lié au fait que le nombre de maillages considéré lors de l'apprentissage servant à déterminer les paramètres du noyau *RBF* est très faible. En effet un corpus constitué de 88 maillages avec leurs valeurs *MOS* ne permettrait pas de mettre en œuvre une métrique efficace dans un contexte de distorsions différentes.

Nous avons également testé notre indice de qualité sans référence *BSMQI* sur des maillages 3D n'appartenant pas aux bases de maillages utilisées dans le processus d'apprentissage et de régression. Nous reprenons les maillages ayant servi pour montrer les résultats de notre algorithme de simplification adaptative (figure 2.5). La figure 4.2 présente les résultats de *BSMQI* sur le maillage 3D de référence représentant un scan d'une tête humaine ainsi que sur ses versions simplifiées. Nous pouvons remarquer que *BSMQI* fournit des scores de qualité cohérents en concordance avec la vision humaine. Le maillage de référence (figure 4.2(a)) obtient un score de qualité égal à 6.13. Le maillage simplifié avec notre méthode (figure 2.5(b)) obtient un score de qualité de 6.28 et le maillage simplifié avec la méthode de Garland et Heckbert [Garland and Heckbert, 1997] (figure 4.2(c)) obtient un score de 6.74 (dans notre approche, un score de qualité faible signifie une bonne qualité et un score de qualité important fait référence à une mauvaise qualité). Ceci confirme également l'apport de la saillance dans notre algorithme de simplification. Celle-ci permet d'avoir un maillage simplifié de bonne qualité dont les détails sont préservés en comparaison avec l'approche de Garland et Heckbert n'intégrant pas la saillance.

A la lumière de ces résultats et vu la capacité de notre approche à évaluer sans référence la qualité d'un maillage dégradé, notre métrique apparaît néanmoins compétitive avec les métriques nécessitant la version de référence du maillage pour l'évaluation de la qualité. Par exemple, cette approche d'évaluation sans référence de la qualité obtient de meilleurs taux de corrélation sur la base Liris Masking que la méthode d'évaluation avec référence proposée dans le chapitre précédent. Ceci pourrait être expliqué par la segmentation du maillage en patches.

4.3 Conclusion et perspectives

Nous avons décrit une nouvelle approche répondant au problème de l'évaluation de la qualité sans référence des maillages 3D. Cette nouvelle métrique *BSMQI* utilise de



FIGURE 4.2: Résultat de de l'indice de qualité BSMQI sur des maillage n'appartenant à aucune base de maillage entrant dans le processus d'apprentissage et de régression : a) maillage de référence (276402 faces), b) maillage simplifié avec notre méthode prenant en compte la saillance (5000 faces) et c) maillage simplifié avec la méthode de [Garland and Heckbert, 1997] (5000 faces).

simples caractéristiques (moyenne et écart type) calculées sur une carte de saillance et une carte de rugosité pour évaluer la qualité d'un maillage dégradé sans avoir recours à sa version de référence. Les performances en terme de corrélation avec les scores de qualité des observateurs humains montrent que notre métrique est compétitive avec les métriques d'évaluation avec référence de la qualité. Dans le futur, nous chercherons à améliorer à la fois la carte de saillance utilisée pour le calcul des statistiques et le processus de régression. En effet, nous estimons que l'apprentissage sur un corpus de taille plus importante conduira à une meilleure prédiction de la qualité dans un contexte comprenant différents types de distorsions. Une autre piste d'amélioration consisterait à considérer l'aspect multi-échelle à partir de la taille des superfacettes.

Conclusion générale et perspectives

Nous résumons ici les différentes contributions proposées dans le cadre de cette thèse ainsi que les perspectives qui en découlent.

Saillance visuelle des maillages 3D

La première partie de ce manuscrit présente nos contributions dans la détection de la saillance visuelle des maillages 3D et ses applications. Nous avons commencé dans le premier chapitre par définir la saillance sous un aspect physiologique, ensuite nous avons décrit les approches récentes détectant la saillance des maillages 3D non colorés. Ceci nous a permis de sélectionner quelques attributs de la perception humaine sensibles à la saillance exposée par les objets 3D. Ainsi, nous avons proposé un modèle de saillance des maillages 3D non colorés basé sur les patches locaux adaptatifs. Les résultats de détection de la saillance ont été comparés à une vérité terrain pour attester de la pertinence des régions saillantes détectées.

Etant donné que les variations de couleurs influent sur la saillance, nous avons étendu notre modèle saillance aux maillages 3D colorés. En raison de l'absence d'un corpus et d'une vérité terrain associés aux maillages 3D colorés, nous avons scanné plusieurs objets 3D afin de tester notre modèle de saillance colorimétrique. Les résultats furent satisfaisants sans pour autant les avoir validés en les comparant avec une vérité terrain. Ceci constitue une première perspective de ce travail de thèse.

Une deuxième perspective concerne la proposition d'une nouvelle vérité terrain relative à la saillance attentionnelle des maillages 3D non colorés (associée au processus *Bottom up*). En effet, lors des protocoles d'élaboration des deux vérités terrains existantes, des instructions ont été assignées aux observateurs lors des campagnes psychovisuelles et comme expliqué dans le premier chapitre, ces consignes influencent le mouvement oculaire des observateurs.

Une troisième perspective s'inscrit dans la définition automatique d'un rayon de voisinage sphérique considéré lors de la construction des patches locaux adaptatifs. Celui-ci permettrait d'améliorer la carte de saillance afin de mieux prendre en compte les distorsions affectant la surface du maillage 3D. Cet aspect pourrait être également amélioré en

considérant l'aspect multi-échelle d'une manière différente à celle que nous avons présentée. En effet, nous pouvons diminuer le maillage à traiter en différentes résolutions et ainsi calculer la carte de saillance sur ces dernières.

Une quatrième perspective est liée à une nouvelle formulation de la combinaison des cartes de saillance géométrique et colorimétrique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté trois applications tirant profit de notre modèle de saillance relatif aux maillages non colorés. La première concerne la sélection automatique des points de vues les plus informatifs d'un maillage 3D. La deuxième application traite la simplification adaptative des maillages 3D dont le but est de préserver la qualité du maillage résultant en simplifiant moins les régions saillantes du maillage. La troisième application s'inscrit dans l'amélioration des détails d'un maillage 3D. Ces trois applications ont montré l'apport et la précision de notre modèle de saillance. Des applications similaires pourraient être facilement mises en œuvre pour les maillages 3D colorés en intégrant le modèle de saillance colorimétrique proposé dans le cadre de cette thèse.

Evaluation de la qualité perçue des maillages 3D

Dans la deuxième partie de ce manuscrit, nous avons présenté nos contributions dans le domaine de l'évaluation de la qualité des maillages 3D non colorés. Nous avons décrit dans le chapitre 4 notre nouvelle métrique d'évaluation avec référence de la qualité *SMQI*. La prise en compte du masquage visuel et de la saillance dans le pipeline de notre algorithme a conduit à des taux de corrélation élevés avec la perception humaine. Malgré tout, quelques améliorations sont envisageables. Notre métrique *SMQI* est destinée aux maillages 3D dont la connectivité reste inchangée après une déformation. Ceci, par exemple, ne permet pas d'évaluer avec référence la qualité d'un maillage simplifié. Une étape de mise en correspondance entre les nœuds du maillage de référence et les nœuds du maillage dégradé sera intégrée dans nos travaux futurs.

La deuxième amélioration envisageable concerne la définition d'un rayon de voisinage sphérique automatique lors de la construction des patches locaux pour le calcul de la carte de saillance. Nous avons vu comment un rayon restreint amenait à une carte de saillance détectant les régions saillantes fines associées aux petits détails alors qu'un rayon important conduisait à une détection des zones saillantes larges. Ainsi le rayon devrait être spécifié en fonction de l'application dans laquelle le calcul de la saillance est opéré. Cependant, dans un contexte d'évaluation de la qualité, une carte de saillance reflétant les zones saillantes ayant subi une distorsion est nécessaire. Celle-ci ne serait d'autant plus efficace que si le rayon dépendait de la géométrie du maillage. Par conséquent, un rayon automatique propre au maillage améliorerait considérablement la corrélation avec les

scores de qualités des observateurs humains.

Le dernier chapitre de ce manuscrit a traité un problème difficile relatif à l'évaluation sans référence de la qualité des maillages 3D. Nous avons proposé une approche *BSMQI* capable d'évaluer la qualité perçue d'un maillage dégradé sans avoir recours à sa version de référence. A cet effet, nous avons repris notre modèle de saillance proposé et pris en compte l'effet du masquage visuel. Les résultats ont montré que dans un contexte à fort degré de masquage et intégrant une unique distorsion (bruit additif), les taux de corrélation avec la perception humaine sont très élevés et concurrençaient les métriques d'évaluation avec référence de la qualité. Cependant dans un contexte à plusieurs distorsions, les taux de corrélation sont inférieurs aux taux des métriques avec référence. En plus de l'amélioration de la carte de saillance expliquée dans le paragraphe précédent, nous estimons que la prise en compte de nouveaux attributs corrélés à la perception améliorerait les prédictions de la qualité. De plus, en raison de l'apprentissage opéré par notre algorithme, la taille du corpus évalué subjectivement devrait être plus importante que celle utilisée dans le cadre de cette thèse. Pour cela, nous envisageons de mener une campagne psychovisuelle destinée à l'évaluation de la qualité des maillages issues de la base construite dans le cadre de cette thèse. Enfin la méthode proposée repose sur la segmentation d'un maillage en un nombre de superfacettes qui forcément a une influence sur les résultats obtenus. La considération de plusieurs niveaux de segmentation, exploitant différents nombres de superfacettes, permettrait de disposer d'une information multi-échelle qui pourrait permettre d'améliorer les résultats.

Bibliographie

- [Achanta et al., 2009] Achanta, R., Hemami, S., Estrada, F., and Susstrunk, S. (2009). Frequency-tuned salient region detection. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on*, pages 1597–1604.
- [Alliez et al., 2003] Alliez, P., Cohen-Steiner, D., Devillers, O., Lévy, B., and Desbrun, M. (2003). Anisotropic polygonal remeshing. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3) :485–493.
- [Aspert et al., 2002] Aspert, N., Cruz, D. S., and Ebrahimi, T. (2002). Mesh : Measuring error between surfaces using the hausdorff distance. In *ICME*, volume 1, pages 705–708.
- [Bolin and Meyer, 1998] Bolin, M. R. and Meyer, G. W. (1998). A perceptually based adaptive sampling algorithm. In *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '98*, pages 299–309. ACM.
- [Boulos et al., 2009] Boulos, F., Parrein, B., Callet, P. L., and Hands, D. (2009). Perceptual effects of packet loss on H.264/AVC encoded videos. In *VPQM workshop*.
- [Buades et al., 2005] Buades, A., Coll, B., and Morel, J.-M. (2005). A non-local algorithm for image denoising. In *Proceedings of the Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Volume 02*, pages 60–65. IEEE Computer Society.
- [Bulbul et al., 2011] Bulbul, A., Capin, T., Lavoué, G., and Preda, M. (2011). Assessing visual quality of 3-d polygonal models. *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(6) :80–90.
- [Chang and Lin, 2011] Chang, C.-C. and Lin, C.-J. (2011). LIBSVM : A library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2 :27 :1–27 :27.
- [Chen et al., 2012] Chen, X., Sapiro, A., Pang, B., and Funkhouser, T. (2012). Schelling points on 3d surface meshes. *ACM Transactions on Graphics*, 31(4) :29 :1–29 :12.
- [Cho et al., 2007] Cho, J. W., Prost, R., and Jung, H. Y. (2007). An oblivious watermarking for 3-d polygonal meshes using distribution of vertex norms. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(1) :142–155.

-
- [Choudhury and Medioni, 2011] Choudhury, A. and Medioni, G. (2011). Perceptually motivated automatic sharpness enhancement using hierarchy of non-local means. In *International Conference on Computer Vision Workshops*, pages 730–737.
- [Cignoni et al., 1998] Cignoni, P., Rocchini, C., and Scopigno, R. (1998). Metro : Measuring Error on Simplified Surfaces. *Computer Graphics Forum*, 17(8) :167–174.
- [Cohen-Steiner and Morvan, 2003] Cohen-Steiner, D. and Morvan, J.-M. (2003). Restricted delaunay triangulations and normal cycle. In *Proceedings of the Nineteenth Annual Symposium on Computational Geometry*, SCG '03, pages 312–321. ACM.
- [Coren et al., 2003] Coren, S., Ward, L. M., and Enns, J. T. (2003). *Sensation and perception*. Wiley Son.
- [Corsini et al., 2007] Corsini, M., Gelasca, E. D., Ebrahimi, T., and Barni, M. (2007). Watermarked 3-d mesh quality assessment. *IEEE Transactions on Multimedia*, 9(2) :247–256.
- [Corsini et al., 2013] Corsini, M., Larabi, M. C., Lavoué, G., Petřík, O., Váša, L., and Wang, K. (2013). Perceptual Metrics for Static and Dynamic Triangle Meshes. *Computer Graphics Forum*, 32(1) :101–125.
- [Derrington et al., 1984] Derrington, A. M., Krauskopf, J., and Lennie, P. (1984). Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *The journal of Physiology*, 357 :241–265.
- [Deubel et al., 1996] Deubel, H., Schneider, W. X., and Bridgeman, B. (1996). Postsaccadic target blanking prevents saccadic suppression of image displacement. *Vision research*, 36 :985 – 996.
- [Digne et al., 2012] Digne, J., Chaine, R., and Valette, S. (2012). Self-similarity for accurate compression of point sampled surfaces. *Eurographics*, 33(2).
- [Dutagaci et al., 2011] Dutagaci, H., Cheung, C. P., and Godil, A. (2011). Evaluation of 3d interest point detection techniques. In *Proceedings of the 4th Eurographics Conference on 3D Object Retrieval*, 3DOR '11, pages 57–64. Eurographics Association.
- [Elad, 2005] Elad, M. (2005). Retinex by two bilateral filters. In *Proceedings of the 5th International Conference on Scale Space and PDE Methods in Computer Vision*, pages 217–229.
- [Elmoataz et al., 2008] Elmoataz, A., Lezoray, O., and Bougleux, S. (2008). Nonlocal discrete regularization on weighted graphs : a framework for image and manifold processing. *IEEE transactions on Image Processing*, 17(7) :1047–1060.

- [Engeldrum, 2000] Engeldrum, P. (2000). *A toolkit for imaging systems development*. Imco-tek Pr.
- [Engelke et al., 2010] Engelke, U., Pepion, R., Le Callet, P., and Zepernick, H.-J. (2010). Linking distortion perception and visual saliency in h.264/avc coded video containing packet loss. volume 7744, pages 774406–774406–10.
- [Findlay, 2004] Findlay, J. M. (2004). Eye scanning and visual search. In *The interface of language, vision and action : eye movements and the visual world*, chapter 10, pages 135 – 159. Psychology Press, New York.
- [Ford and Roberts, 1998] Ford, A. and Roberts, A. (1998). Colour Space Conversions.
- [Gal and Cohen-Or, 2006] Gal, R. and Cohen-Or, D. (2006). Salient geometric features for partial shape matching and similarity. *ACM Transaction on Graphics*, 25(1) :130–150.
- [Garland and Heckbert, 1997] Garland, M. and Heckbert, P. S. (1997). Surface simplification using quadric error metrics. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '97*, pages 209–216. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [Guo et al., 2016] Guo, J., Vidal, V., Cheng, I., Basu, A., Baskurt, A., and Lavoué, G. (2016). Subjective and objective visual quality assessment of textured 3d meshes. *ACM Transaction on Applied Perception*, 14(2) :11 :1–11 :20.
- [Guy and Medioni, 1997] Guy, G. and Medioni, G. (1997). Inference of surfaces, 3d curves, and junctions from sparse, noisy, 3d data. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(11) :1265–1277.
- [Henderson et al., 2005] Henderson, J., Williams, C., and Falk, R. (2005). Eye movements are functional during face learning. *Memory and cognition*, 33(1) :98–106.
- [Henderson, 2003] Henderson, J. M. (2003). Human gaze control in real-world scene perception. *Trends in cognitive sciences*, 7 :498 – 504.
- [Hoffman and Subramaniam, 1995] Hoffman, J. E. and Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Perception and Psychophysics*, pages 787 – 795.
- [Hoppe et al., 1992] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J., and Stuetzle, W. (1992). Surface reconstruction from unorganized points. *SIGGRAPH Computer Graphics*, 26(2) :71–78.

-
- [Hou and Zhang, 2007] Hou, X. and Zhang, L. (2007). Saliency detection : A spectral residual approach. In *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1–8.
- [Howard, 2002] Howard, I. (2002). In *Seeing in depth*. University of Toronto Press.
- [human-eye blog,] human-eye blog. <http://the--human-eye.blogspot.com/>.
- [Itti et al., 1998] Itti, L., Koch, C., and Niebur, E. (1998). A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(11) :1254 – 1259.
- [ITU, 2002] ITU (2002). ITU-R BT.500-11 Méthodologie d'évaluation subjective de la qualité des images de télévision. Technical report, International Telecommunication Union.
- [ITU-T Recommendation P.910, 2008] ITU-T Recommendation P.910 (2008). Subjective video quality assessment methods for multimedia applications.
- [Jia et al., 2014] Jia, S., Zhang, C., Li, X., and Zhou, Y. (2014). Mesh resizing based on hierarchical saliency detection. *Graphical Models*, 76(5) :355 – 362. Geometric Modeling and Processing 2014.
- [Jinho et al., 2004] Jinho, L., Baback, M., Hanspeter, P., and Machiraju, M. R. (2004). Finding optimal views for 3D face shape modeling. In *Proc. International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, pages 31–36.
- [Johnson and Hebert, 1999] Johnson, A. E. and Hebert, M. (1999). Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3d scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(5) :433–449.
- [Kim et al., 2010] Kim, Y., Varshney, A., Jacobs, D. W., and Guimbretière, F. (2010). Mesh saliency and human eye fixations. *ACM Transactions on Applied Perception*, 7(2) :12 :1–12 :13.
- [Koch and Poggio, 1999] Koch, C. and Poggio, T. (1999). Predicting the visual world : silence is golden. *Nat Neurosci*, 2(1) :9–10.
- [Kohavi, 1995] Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. pages 1137–1143. Morgan Kaufmann.
- [Kolev et al., 2014] Kolev, K., Tanskanen, P., Speciale, P., and Pollefeys, M. (2014). Turning mobile phones into 3d scanners. In *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 3946–3953.

- [Kowler et al., 1995] Kowler, E., Anderson, E., Doshier, B., and Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision research*, 35 :1897 – 1916.
- [Lavoué, 2009] Lavoué, G. (2009). A local roughness measure for 3D meshes and its application to visual masking. *ACM Transactions on Applied Perception*, 5(4) :21 :1–21 :23.
- [Lavoué, 2011] Lavoué, G. (2011). A multiscale metric for 3D mesh visual quality assessment. *Computer Graphics Forum*, 30(5) :1427–1437.
- [Lavoué et al., 2006] Lavoué, G., Drelie Gelasca, E., Dupont, F., Baskurt, A., and Ebrahimi, T. (2006). Perceptually driven 3D distance metrics with application to watermarking. In *Proc. SPIE, Applications of Digital Image Processing*, volume 6312, pages 63120L–63120L–12.
- [Lavoué et al., 2016] Lavoué, G., Larabi, M., and Vása, L. (2016). On the efficiency of image metrics for evaluating the visual quality of 3d models. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 22(8) :1987–1999.
- [Lavoué and Corsini, 2010] Lavoué, G. and Corsini, M. (2010). A comparison of perceptually-based metrics for objective evaluation of geometry processing. *IEEE Transactions on Multimedia*, 12(7) :636–649.
- [Le Meur et al., 2006] Le Meur, O., Le Callet, P., Barba, D., and Thoreau, D. (2006). A coherent computational approach to model bottom-up visual attention. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(5) :802–817.
- [Lee et al., 2005] Lee, C., Varshney, A., and Jacobs, D. W. (2005). Mesh saliency. *ACM Transactions on Graphics*, 24(3) :659–666.
- [Lézoray, 2017] Lézoray, O. (2017). 3d colored mesh graph signals multi-layer morphological enhancement. In *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*.
- [Ling and Okada, 2006] Ling, H. and Okada, K. (2006). Diffusion distance for histogram comparison. In *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 1, CVPR '06*, pages 246–253. IEEE Computer Society.
- [Liu et al., 2014] Liu, Z., Zou, W., and Le Meur, O. (2014). A novel saliency detection framework. *IEEE Transactions on Image Processing*, 23(5) :1937 – 1952.
- [Liversedge and Findlay, 2000] Liversedge, S. P. and Findlay, J. M. (2000). Saccadic eye movements and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(1) :6 – 14.

-
- [Mao et al., 2006] Mao, Z.-h., Ma, L.-z., Zhao, M.-x., and Li, Z. (2006). Feature-preserving mesh denoising based on contextual discontinuities. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 7(9) :1603–1608.
- [Maximo et al., 2011] Maximo, A., Patro, R., Varshney, A., and Farias, R. (2011). A robust and rotationally invariant local surface descriptor with applications to non-local mesh processing. *Graphical Models*, 73(5) :231–242.
- [Michelson, 1927] Michelson, A. A. (1927). *Studies in optics*. University of Chicago Press.
- [Microsoft, 2016] Microsoft, H. (2016). <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/holoportation-3/>.
- [Parkhurst and Neibur, 2002] Parkhurst, K. L. and Neibur, E. (2002). Modeling the role of salience in the allocation of overt visual attention. *Vision research*, 42 :107 – 123.
- [Qu and Meyer, 2008] Qu, L. and Meyer, G. W. (2008). Perceptually guided polygon reduction. *IEEE Transactions On Visualization And Computer Graphics*.
- [Rizzolatti et al., 1994] Rizzolatti, G., Riggio, L., and Sheliga, B. (1994). Space and selective attention. In *Attention and performance XV*, pages 231 – 265. MIT Press, Cambridge.
- [Rogowitz and Rushmeier, 2001] Rogowitz and Rushmeier (2001). Are image quality metrics adequate to evaluate the quality of geometric objects? *Human Vision and Electronic Imaging*, pages 340–348.
- [Rusinkiewicz, 2004] Rusinkiewicz, S. (2004). Estimating curvatures and their derivatives on triangle meshes. In *Proceedings of the 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2Nd International Symposium, 3DPVT '04*, pages 486–493. IEEE Computer Society.
- [Shahrbabaki, 2015] Shahrbabaki, S. T. (2015). *Contribution de la couleur dans l'attention visuelle et un modèle de saillance visuelle*. PhD thesis, Université de Grenoble.
- [Shilane and Funkhouser, 2007] Shilane, P. and Funkhouser, T. (2007). Distinctive regions of 3d surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 26(2).
- [Silva et al., 2009] Silva, S., Santos, B. S., Ferreira, C., and Madeira, J. (2009). A perceptual data repository for polygonal meshes. In *Visualisation, 2009. VIZ '09. Second International Conference in*, pages 207–212.
- [Simari et al., 2014] Simari, P., Picciau, G., and De Floriani, L. (2014). Fast and scalable mesh superfacets. *Computers Graphics Forum*, 33(7) :181–190.

- [Song et al., 2014] Song, R., Liu, Y., Martin, R. R., and Rosin, P. L. (2014). Mesh saliency via spectral processing. *ACM Transactions on Graphics*, 33(1) :6.
- [Song et al., 2012] Song, R., Liu, Y., Zhao, Y., Martin, R. R., and Rosin, P. L. (2012). Conditional random field-based mesh saliency. In *19th IEEE International Conference on Image Processing*, pages 637–640.
- [Tal et al., 2012] Tal, A., Shtrom, E., and Leifman, G. (2012). Surface regions of interest for viewpoint selection. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 414–421.
- [Tatler et al., 2005] Tatler, B. W., Baddeley, R. J., and Glichrist, I. D. (2005). Visual correlates of fixation selection : effects of scale and time. *Vision research*, 45 :643 – 659.
- [Taubin, 1995] Taubin, G. (1995). A signal processing approach to fair surface design. In *Proceedings of the 22Nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '95*, pages 351–358. ACM.
- [Torkhani, 2011] Torkhani, F. (2011). Perceptual Quality Assessment of Dynamic Meshes. Master's thesis, Grenoble INP, FRANCE.
- [Torkhani et al., 2014] Torkhani, F., Wang, K., and Chassery, J.-M. (2014). A curvature-tensor-based perceptual quality metric for 3d triangular meshes. *Machine Graphics and Vision*, pages 1–25.
- [Treisman and Gelade, 1980] Treisman, A. M. and Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12(1) :97 – 136.
- [Vapnik, 1995] Vapnik, V. N. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag New York, Inc.
- [vision du futur,] vision du futur, L. <http://lavisiondufutur.e-monsite.com/pages/1-oeil/la-retine.html>.
- [Wang et al., 2011] Wang, K., Lavoué, G., Denis, F., and Baskurt, A. (2011). Robust and blind mesh watermarking based on volume moments. *Computers and Graphics*, 35(1) :1 – 19. Extended Papers from Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR) 2010.
- [Wang et al., 2012] Wang, K., Torkhani, F., and Montanvert, A. (2012). Technical section : A fast roughness-based approach to the assessment of 3D mesh visual quality. *Computer Graphics*, 36(7) :808–818.

-
- [Wang et al., 2004] Wang, Z., Bovik, A., Sheikh, H. R., and Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment : from error visibility to structural similarity. *IEEE T IMAGE PROCESS*, 13(4) :600–612.
- [Wang and Bovik, 2006] Wang, Z. and Bovik, A. C. (2006). *Modern Image Quality Assessment*. Morgan and Claypool.
- [Wang and Bovik, 2011] Wang, Z. and Bovik, A. C. (2011). Reduced- and no-reference image quality assessment. *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(6) :29–40.
- [Widdel, 1984] Widdel, H. (1984). operational problems in analysing eye movements. In *Theoretical and applied aspects of eye movement research*, pages 21 – 29. Elsevier.
- [Wolf, 1994] Wolf, J. M. (1994). Guided search 2.0 : A revised model of visual search. *Psychonomic Bulletin and Review*, 1(2) :202 – 238.
- [Wolfe et al., 2000] Wolfe, J. M., Alvares, G. A., and Horowitz, T. S. (2000). Attention is fast but volition is slow. *Nature*, 406 :691.
- [Wolfe et al., 1989] Wolfe, J. M., Cave, K. R., and Franzel, S. L. (1989). Guided search : an alternative to the feature integration model for visual search. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*.
- [Wolfe and Horowitz, 2004] Wolfe, J. M. and Horowitz, T. S. (2004). What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it ? *Nature reviews Neuroscience*, 5(6) :495–501.
- [Wolfe et al., 2010] Wolfe, J. M., Palmer, E. M., and Horowitz, T. S. (2010). Reaction time distributions constrain models of visual search. *Vision Research*, 50(14) :1304 – 1311. Visual Search and Selective Attention.
- [Wu et al., 2013] Wu, J., Shen, X., Zhu, W., and Liu, L. (2013). Mesh saliency with global rarity. *Graph. Models*, 75(5) :255–264.
- [Xu et al., 2014] Xu, X., Wang, Y., Zhang, X., Li, S., Liu, X., Wang, X., and Tang, J. (2014). A comparison of contrast measurements in passive autofocus systems for low contrast images. *Multimedia Tools Appl.*, 69(1) :139–156.
- [Yarbus, 1967] Yarbus, A. L. (1967). In *Eye movements and vision*. Plenum Press.
- [Yee et al., 2001] Yee, H., Pattanaik, S., and Greenberg, D. P. (2001). Spatiotemporal sensitivity and visual attention for efficient rendering of dynamic environments. *ACM Transactions on Graphics*, 20(1) :39–65.

- [Zhao and Liu, 2012] Zhao, Y. and Liu, Y. (2012). Patch based saliency detection method for 3d surface simplification. In *Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition*, pages 845–848.
- [Zhao et al., 2012a] Zhao, Y., Liu, Y., Song, R., and Zhang, M. (2012a). Extended non-local means filter for surface saliency detection. In *19th IEEE International Conference on Image Processing*, pages 633–636.
- [Zhao et al., 2012b] Zhao, Y., Liu, Y., Song, R., and Zhang, M. (2012b). A saliency detection based method for 3d surface simplification. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP, Kyoto, Japan, March 25-30, 2012*, pages 889–892.
- [Zhao et al., 2013] Zhao, Y., Liu, Y., and Zeng, Z. (2013). Using region-based saliency for 3d interest points detection. In *CAIP (2)*, pages 108–116.
- [Zhu et al., 2010] Zhu, Q., Zhao, J., Du, Z., and Zhang, Y. (2010). Quantitative analysis of discrete 3d geometrical detail levels based on perceptual metric. *Computers and Graphics*, 34(1) :55 – 65.

Table des figures

1.1	Exemples de stimuli utilisés dans des tâches de recherche de cible. . . .	22
1.2	Cartes d'attribut de couleur, d'orientation, de taille et leur fusion en carte d'attention selon le <i>Guided Search model</i> lors d'une recherche conjonctive. [Extrait de [Wolfe et al., 1989]].	23
1.3	Organisation du système visuel.	25
1.4	Points de fixation et parcours oculaire.	26
1.5	Synopsis de l'approche de Lee et al.	30
1.6	Synopsis de l'approche de Tal et al. [Tal et al., 2012]	32
1.7	Sensibilité du système visuel humain au fort contraste, et aux motifs peu répétitifs..	36
1.8	Synopsis du calcul de la saillance mono-échelle.	37
1.9	Patch local adaptatif.	39
1.10	Patches locaux construits.	40
1.11	Saillance mono-échelle calculée avec notre approche	42
1.12	L'apport des coefficients de pondérations sur le rendu de la saillance. . .	43
1.13	Saillance multi-échelle détectée avec notre approche.	46
1.14	Comparaison (1) de la saillance avec une pseudo vérité terrain.	49
1.15	Comparaison (2) de la saillance avec une pseudo vérité terrain.	50
1.16	Détection imprécise de la saillance.	50
1.17	Maillages non "optimisés" et "optimisés"	51
1.18	Comparaison avec l'état de l'art du maillage 3D Dinosaur.	52
1.19	Comparaison de la saillance du maillage 3D Ange.	53
1.20	Comparaison de la saillance du maillage 3D Cheval avec l'état de l'art. . .	54
1.21	La saillance multi-échelle détectée sur d'autres maillages 3D avec notre approche.	55
1.22	Robustesse au bruit.	56
1.23	Robustesse à la simplification.	57
1.24	Objet 3D en cours d'acquisition au sein du laboratoire GREYC.	58
1.25	Quelques maillages 3D de la base de maillages colorés construite.	59
1.26	Quelques maillages 3D dégradés de la base de maillages colorés construite. .	61

1.27	Saillance multi-échelle d'un maillage coloré scanné représentant une tête humaine	62
1.28	Saillance multi-échelle d'un maillage coloré scanné représentant un canard empaillé	62
1.29	Saillance visuelle colorimétrique des maillages 3D présentés sur la figure 1.25.	63
1.30	Saillance multi-échelle calculée dans les espaces couleurs LAB, YCbCr et XYZ [Ford and Roberts, 1998].	64
1.31	Robustesse du modèle de saillance colorimétrique au bruit gaussien sur les coordonnées 3D et couleurs RVB	66
1.32	Saillance multi-échelle globale des maillages colorés.	67
2.1	Illustration d'échantillonnage d'une sphère englobant un maillage le long des axes x et y.	71
2.2	Les points de vues les plus informatifs sélectionnés par notre approche .	72
2.3	Résultats de la sélection automatique des points de vues les plus informatifs de deux patrimoines architecturaux	73
2.4	Comparaison des points de vues les plus informatifs générés par notre approche avec ceux de l'approche [Tal et al., 2012]	74
2.5	Résultat de simplification du maillage représentant une tête humaine avec et sans utilisation de la carte de saillance.	77
2.6	Décomposition d'un signal sur graphes en 3 échelles	78
2.7	Résultat de décomposition d'un maillage en 3 échelles : une échelle lissée sommaire, une échelle représentant les détails moyens et une échelle représentant les détails fins du maillage.	78
2.8	Rehaussement des détails de maillages 3D colorés basé sur la saillance visuelle dans différents espaces de couleurs.	80
2.9	Lissage isotropique VS lissage isotropique adaptatif	81
2.10	Lissage isotropique VS lissage isotropique adaptatif : zoom	82
2.11	Débruitage de maillages 3D colorés	82
3.1	Illustration du masquage visuel dans le contexte des maillages 3D.	89
3.2	Métrie géométrique et corrélation avec la perception humaine	91
3.3	a) Angle dièdre, b) moyenne de la rugosité $G(\cdot)$ et variance de la rugosité $V(\cdot)$. (voir équation 3.2) [Extrait de [Corsini et al., 2007]	92
3.4	a) Fenêtre 3D considérée par la métrie MSDM [Lavoué et al., 2006].	95
3.5	Projection d'un nœud v_i du maillage de référence M_r sur la surface du maillage dégradé M_d . [Extrait de [Torkhani et al., 2014]].	100
3.6	Synopsis de la métrie	103

3.7	Comparaison de maillages 3D avec différentes qualités perçues	105
3.8	Différence entre une carte de saillance multi-échelle et une carte de rugosité	107
3.9	Exemples de maillages 3D appartenant à la base Liris/Epfl General-Purpose.	109
3.10	Exemples de maillages 3D appartenant à la base Liris-Masking	110
3.11	Fonction de régression psychométrique	112
4.1	Synopsis de la métrique sans référence proposée <i>BSMQI</i>	120
4.2	Résultat de de l'indice de qualité sans référence <i>BSMQI</i> sur des maillage n'appartenant à aucune base de maillages entrant dans le processus d'apprentissage et de régression.	125
A.3	Architecture du modèle de saillance d'Itti <i>et al.</i> [Itti <i>et al.</i> , 1998].	148
A.4	Architecture du modèle de saillance d'Achanta. (Extrait de [Achanta <i>et al.</i> , 2009]).	149

Liste des tableaux

1.1	Influence des paramètres ε et l sur la détection de la saillance.	44
1.2	Distorsions utilisées dans la base de maillages 3D créées.	58
3.1	Valeurs de corrélation de Spearman (%) des différentes métriques sur la base de maillages Liris/Epfl General Purpose database	112
3.2	Valeurs de corrélation de Spearman (%) des différentes métriques sur la base de maillages Liris-Masking	113
4.1	Valeurs de corrélation de Spearman (%) des différentes métriques sur la base de maillages Liris-Masking	123
4.2	Valeurs de corrélation de Spearman (%) des différentes métriques sur la base de maillages Liris/Epfl General Purpose.	123

Liste des publications de l'auteur

Revue internationale

[1] A. Nouri, C. Charrier, O. Lézoray, "Multi-scale Mesh Saliency with local adaptive patches for ViewPoint Selection, Signal Processing : Image Communication, Vol. 38, pp. 151-166, 2015."

Conférences internationales avec actes et comité de lecture

[2] A. Nouri, C. Charrier, O. Lézoray, "3D Blind Saliency-based Mesh Quality Assessment Index", Proceeding of SPIE Electronic Imaging, Three-Dimensional Image Processing, Measurement (3DIPM), and Applications, 2017. (Accepté, à paraître)

[3] A. Nouri, C. Charrier, O. Lézoray, "Full-Reference Saliency-Based 3D Mesh Quality Assessment Index", International Conference on Image Processing (IEEE), 2016.

[4] A. Nouri, C. Charrier, O. Lézoray, "Multi-scale Saliency of 3D Colored Meshes", International Conference on Image Processing (IEEE), pp. 2820-2824, 2015.

[5] A. Nouri, C. Charrier, O. Lézoray, "Mesh saliency with adaptive local patches", Proceeding of SPIE Electronic Imaging, Three-Dimensional Image Processing, Measurement (3DIPM), and Applications, Vol. 9393, pp. 93930D-93930D-12, 2015.

Conférences nationales françaises avec actes et comité de lecture

[6] A. Nouri, C. Charrier, O. Lézoray, "Saillance visuelle multi-échelle des maillages 3D colorés", CORESA (COMpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels), Nancy, France 2016.

[7] A. Nouri, C. Charrier, O. Lézoray, "Saillance visuelle multi-échelle des maillages 3D par patches locaux adaptatifs pour la sélection des points de vues optimaux", Conférence GRETSI 2015 Lyon - France.

Conférences nationales françaises sans actes et avec comité de lecture

[8] A. Nouri, C. Charrier, O. Lézoray, "Saillance visuelle des maillages 3D par patches locaux adaptatifs", Conférence de l'AFIG (Association Française de l'Informatique Graphique), 2014. Reims - France.

Annexe

A.1 Saillance visuelle des images 2D

A.1.1 Modèle de saillance d'Itti et al.

Itti *et al.* [Itti et al., 1998] proposent un modèle de saillance bio-inspiré du système visuel humain. Ses principales étapes sont les suivantes :

- ▶ Des sous-échantillonnages et filtrages passes-bas sont opérés sur l'image d'entrée pour la décomposer en 9 échelles spatiales.
- ▶ A partir de ces neuf échelles, trois types de structures locales sont détectées (couleurs, luminance, orientations) afin de produire différentes cartes de saillance.
- ▶ Un total de 42 cartes de saillance sont produites. 12 cartes sont consacrées à la couleur, six à luminance, et 24 aux orientations.
- ▶ Pour la prise en compte de la couleur, quatre cartes sont générées par l'extraction du rouge, vert, bleu et jaune.
- ▶ Les orientations sont analysées par l'intermédiaire d'un banc de filtres de Gabor orientés. L'objectif est de mimer les réponses des champs récepteurs des neurones sélectifs en orientation dans V1.
- ▶ Des cartes de visibilité (*conspicuity map*) sont générées pour chaque type de caractéristique par une normalisation et une détection des maxima locaux. Ces cartes de visibilité favorisent les régions différentes de leur voisinage en reproduisant les mécanismes du centre-pourtour.
- ▶ Fusion des cartes de visibilité par une moyenne.
- ▶ Prédiction d'un parcours oculaire par la suppression des zones les plus saillantes.

Un schéma résumant l'architecture de ce modèle est présenté sur la figure A.3.

Le Meur *et al.* [Le Meur et al., 2006] affine le modèle de saillance d'Itti en remplaçant l'espace RVB par l'espace couleur perceptuel de Krauskopf [Derrington et al., 1984] afin de prendre en compte l'antagonisme des couleurs effectué par les cellules de la rétine. Il applique également sur chaque canal couleur une fonction de sensibilité au contraste pour reproduire la sensibilité spatiale du SVH. Cependant, le gain en terme de performance semble négligeable face à la complexité calculatoire ajoutée.

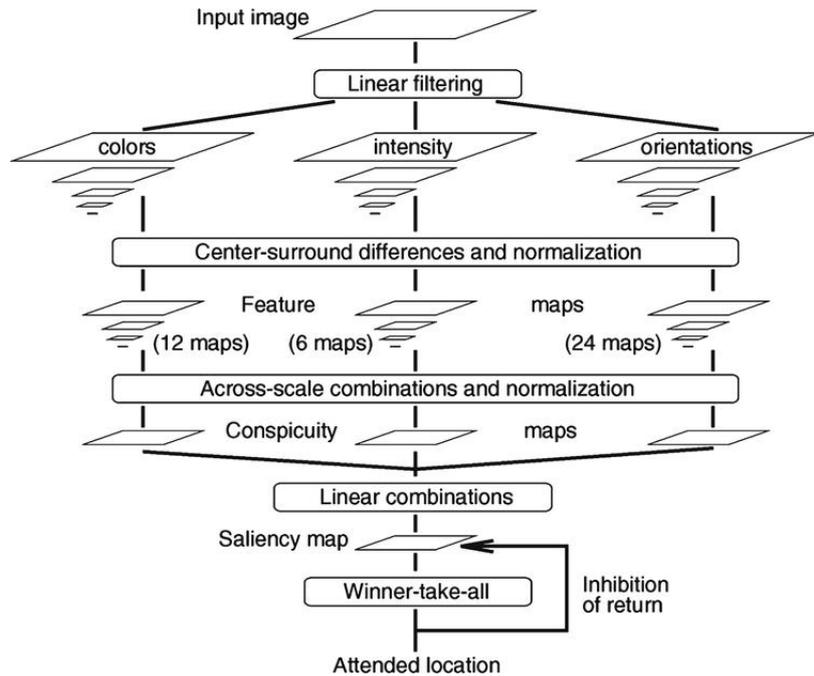


FIGURE A.3: Architecture du modèle de saillance d'Itti *et al.* [Itti *et al.*, 1998].

A.1.2 Modèle d'Achanta *et al.*

Achanta *et al.* [Achanta *et al.*, 2009] proposent un modèle de saillance de faible complexité basé sur la luminance et les couleurs de l'image. Ce dernier fait ressortir et isole les gros objets saillants tout en préservant les contours.

L'approche d'Achanta *et al.* calcule la saillance d'une image dans l'espace couleur CIE-LAB. La carte de saillance S est définie par :

$$S(x, y) = ||I_{\mu} - I_{w_{hc}}(x, y)||$$

où I_{μ} représente la moyenne sur chaque canal de l'image et $I_{w_{hc}}(x, y)$ est le pixel à la position (x, y) de l'image d'entrée lissée par un filtre gaussien. La simplicité et la faible complexité de ce modèle de saillance le rend compétitif avec l'état de l'art. L'architecture de ce modèle est présentée sur la Figure A.4.

A.1.3 Corrélation de Spearman

Dans le contexte des métriques avec référence, le calcul de la corrélation de Spearman se déroule de la manière suivante (la première colonne représente les prédictions de la métrique, la deuxième colonne représente les valeurs du MOS ou DMOS) :

- 1 Tri de la première colonne (en gardant l'association avec les valeurs de la deuxième colonne).

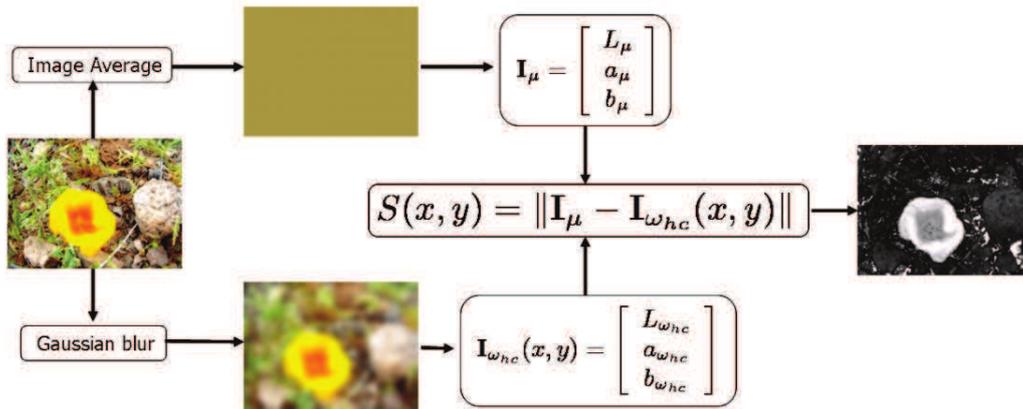


FIGURE A.4: Architecture du modèle de saillance d'Achanta. (Extrait de [Achanta et al., 2009]).

- ② Affectation d'un numéro d'ordre (rang) croissant pour la première colonne triée.
- ③ Tri de la deuxième colonne.
- ④ Affectation d'un numéro d'ordre croissant pour la deuxième colonne triée.
- ⑤ Calcul du carré de la différence entre chaque deux rangs.

Le coefficient de corrélation des rangs de Spearman est ensuite calculé par :

$$\text{Coefficient de Spearman} = 1 - \frac{\sum \text{difference}(i)^2}{n(n^2 - 1)}$$

où i est l'indice du carré de la différence de chaque deux rangs et n est le nombre total d'observations.

Résumé

Le regard de tout être humain est attiré par des régions particulières appartenant aux objets (pouvant être représentés par des maillages 3D). Cette attractivité dépend fortement du degré de saillance exposé par ces régions. Le premier objectif de cette thèse est de proposer et de mettre en oeuvre un modèle permettant de détecter automatiquement les zones saillantes sur les maillages 3D non colorés. Nous considérons qu'un noeud du maillage est saillant s'il ressort fortement de son voisinage local et si sa configuration géométrique est différente de celle de ses voisins adjacents. Pour cela nous caractérisons la surface du maillage par un descripteur local sous forme de patch de taille adaptative. Ce dernier est utilisé dans le calcul des similarités et intégré dans le calcul de la carte saillance multi-échelle. Nous proposons également une extension de ce modèle pour la détection de la saillance des maillages colorés.

Quatre applications basées sur le modèle de saillance proposé ont été développées après la validation des résultats de notre modèle sur des maillages non colorés issus d'une pseudo vérité terrain. Les premières et deuxièmes applications concernent respectivement la sélection automatique des points de vues optimaux et la compression adaptative des maillages 3D non colorés. Les troisièmes et quatrièmes applications s'inscrivent respectivement dans le cadre de l'amélioration de détails et du lissage adaptatif des maillages 3D colorés.

Le deuxième objectif de cette thèse consiste à proposer une métrique d'évaluation de la qualité avec référence des maillages 3D. En mettant en entrée de cette métrique un maillage original (supposé parfait sans dégradation) et un deuxième maillage dégradé, le but sera d'évaluer le degré de fidélité du maillage dégradé relativement à sa version de référence en fournissant un score de fidélité qui soit le plus proche possible des scores fournis par les observateurs humains. Étant donné que la saillance visuelle est une information pertinente pour notre système visuel, son utilisation dans le pipeline de la métrique est naturel. Nous utilisons deux propriétés des maillages 3D pour évaluer objectivement la qualité : la saillance multi-échelle et la rugosité. En effet, la carte de saillance servira à l'extraction des informations structurelles du maillage 3D et la carte de rugosité à la prise en compte de l'effet de masquage visuel. Nous introduisons quatre fonctions de comparaisons entre deux voisinages locaux correspondants des deux maillages pour estimer les différences structurelles entre eux. Nous combinons ces dernières par une somme de Minkowski pondérée pour obtenir le score de qualité final.

Le troisième objectif de cette thèse s'inscrit dans la mise en oeuvre d'une métrique d'évaluation de la qualité sans référence d'un maillage 3D. Contrairement à une métrique avec référence, cette catégorie de métriques est considérée comme la plus épineuse pour évaluer objectivement la qualité d'un maillage dégradé dans la mesure où la version de référence du maillage n'est pas utilisée. Similairement à la métrique avec référence, nous supposons que la qualité visuelle d'un maillage 3D est davantage dépréciée lorsque les régions saillantes du maillage sont affectées et vice-versa. Nous commençons par segmenter le maillage en un nombre de surfacettes qui joueront le rôle de patches locaux dans ce contexte. Nous affectons à chaque noeud d'une surfacette ses valeurs de saillance et de rugosité respectives puis nous extrayons quatre caractéristiques locales de chaque surfacette (moyenne de la saillance, écart type de la saillance, covariance de la saillance et la moyenne de la rugosité). Les variations de ces quatre caractéristiques quantifient les distorsions que peut subir un maillage. Finalement, nous effectuons un apprentissage basé sur les Séparateurs à Vastes Marges (SVM) en utilisant le vecteur de caractéristiques construit : puis pour passer d'une représentation vectorielle du maillage à un score de qualité final, nous utilisons une régression par SVMs. **Indexation RAMEAU** : Saillance visuelle, modélisation tridimensionnelle,

théorie des graphes, maillages 3D, évaluation de la qualité

Abstract

The glance of each human being is attracted by specific areas into 3D objects (that can be represented by meshes). This attraction depends on the degree of saliency exposed by these areas. The first goal of this thesis is to propose an approach for detecting visual salient areas on 3D non-colored meshes. We consider that a vertex is salient if it strongly stands out from its local neighborhood and if its geometric configuration is different from its adjacent vertices. For this, we characterize the surface of the 3D mesh by the use of a local vertex descriptor in the form of an adaptive patch. This descriptor is used as a basis for similarity computation and integrated into a weighted multi-scale saliency computation. We propose also an extension of our visual saliency model to 3D colored meshes.

Four saliency-based applications were developed after the validation of the saliency detection results with a pseudo ground truth. The first and the second one concern respectively the optimal viewpoint selection and the adaptive compression of 3D non-colored meshes. The third one sharpens the details of a 3D colored mesh, and the fourth smooths adaptively its colors.

The second aim is to propose a novel perceptual full reference metric for the quality assessment of 3D meshes. Given a 3D reference mesh (reputed devoid of any distortions) and a 3D distorted mesh as inputs of this metric, the goal is to assess the perceived quality of the distorted mesh by providing a fidelity score which must be as close as possible to the human scores. As visual saliency is a pertinent information for our visual system, its use in the pipeline of the quality metric is natural. We use two properties of 3D meshes for evaluating their perceived quality: the visual saliency and the roughness. The multi-scale saliency map is used for the extraction of the structural information of the 3D mesh and the roughness map for the account of the visual masking effect. We introduce 4 comparison functions between 2 corresponding local neighborhoods in order to estimate the structural differences between them. We combine these functions with a weighted Minkowski sum so as to obtain a final quality score.

The third objective of this thesis is to provide an approach for the difficult problem of the no-reference quality assessment of 3D meshes. On the contrary to full reference metrics, this category is considered as the thorniest since the reference version of the 3D mesh is not used. Similarly to the full reference metric, we suppose that the visual quality of a 3D mesh is more affected when the salient areas of the mesh are affected and vice versa.

We begin by segmenting the mesh into a number of Superfacets which represent the local patches in this context. Then we affect to each vertex of a Superfacet its respective values of saliency and roughness. Afterward, we extract four local characteristics of each Superfacet (mean saliency, standard-deviation saliency, covariance saliency and mean roughness). Variations of these 4 characteristics quantify effectively the distortions that a mesh may undergo. Finally, we perform a learning step based on SVMs (Support Vector Machines) using the constructed feature vector: to move from a vectorial representation to a final quality score, we use a regression SVM scheme.

RAMEAU Index : Visual saliency, tridimensional modelisation, graphs theory, 3D meshes, quality assessment