



HAL
open science

Digitalisation sécurisée d'objets 3D : application aux formes et aux lignes de style de chaussures

Philippe Amat

► **To cite this version:**

Philippe Amat. Digitalisation sécurisée d'objets 3D : application aux formes et aux lignes de style de chaussures. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2008. Français. NNT : . tel-00320765

HAL Id: tel-00320765

<https://theses.hal.science/tel-00320765v1>

Submitted on 11 Sep 2008

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.

ACADÉMIE DE MONTPELLIER
UNIVERSITÉ MONTPELLIER II
- SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC -

THÈSE

présenté pour obtenir

le grade de : DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ MONTPELLIER II
Mention TRAITEMENT DU SIGNAL

par

Philippe AMAT

Discipline : Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal
Formation Doctorale : Systèmes Automatique et Microélectroniques
École Doctorale : Information, Structures et Systèmes

Titre de la thèse :

**Digitalisation sécurisée d'objets 3D : application aux
formes et aux lignes de style de chaussures**

Soutenue publiquement le 02 juillet 2008

JURY

Jean-Luc DUGELAY	Professeur, EURECOM	Rapporteur
Florent DUPONT	MCF, LIRIS	Rapporteur
Atila BASKURT	Professeur, LIRIS	Examineur
André CROSNIER	Professeur, Univ.Montpellier II, LIRMM	Examineur
Sébastien DRUON	MCF, Univ.Montpellier II, LIRMM	Co-Directeur de thèse
William PUECH	MCF, Univ.Nîmes/Montpellier II, LIRMM	Directeur de thèse
Jean-Pierre PEDEBOY	PDG, STRATEGIES	Invité

Résumé

Les progrès en imagerie 3D ont contribué à l'augmentation de leurs utilisations dans de nombreuses applications. L'évolution des débits des lignes internet ont rendu les transmissions d'objets 3D de plus en plus importantes. Les travaux sur la protection des objets 3D sont donc un sujet d'actualité. Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre la société STRATEGIE et le LIRMM (Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier). Nous abordons deux sujets manipulant des objets 3D. Le premier sujet abordé est la digitalisation de forme intérieure de chaussure. L'algorithme de digitalisation repose sur une méthode de *shape from silhouettes*. L'acquisition des silhouettes se fait à l'aide d'un appareil photo numérique et d'un plateau rotatif sur lequel repose l'objet à digitaliser. Le second sujet abordé est le tatouage d'objet 3D. Nous proposons, dans cette thèse, deux méthodes d'insertion de données cachées ne s'appuyant pas sur la modification des sommets des objets 3D pour réaliser l'insertion. Ces méthodes permettent d'insérer des méta-données dans des objets 3D comme le nom de l'auteur, la date de création de l'objet, un logo 2D ou 3D, la couleur de l'objet ou encore la texture de l'objet lui même. L'idée principale des deux méthodes est de trouver et de synchroniser des zones particulières pouvant être utilisées pour insérer le message. L'insertion de données s'appuie sur la modification de la connectivité des arêtes dans des zones sélectionnées. Ces modifications ont pour conséquence de modifier la structure des triangles construits dans ces zones. Ces méthodes de dissimulation présentent l'avantage de ne pas modifier la position initiale des points du modèle 3D. Cet invariant sur la position des points nous permet de rendre l'insertion robuste aux transformations affines de type rotation, translation ou changement d'échelle.

Table des matières

Introduction Générale	7
Contexte de la thèse	7
Plan du manuscrit	11
I État de l’art	13
1 Objet 3D : modélisation, modifications, métriques et acquisition	17
Introduction	17
1.1 Modélisation géométrique d’objets 3D	17
1.1.1 Modèles non structurés	18
1.1.2 Modèles volumiques	19
1.1.3 Modèles surfaciques	21
1.2 Changement de modélisation	27
1.2.1 Du modèle volumique au maillage triangulé	27
1.2.2 Du nuage de points au maillage triangulé	27
1.3 Modifications des modèles 3D	28
1.3.1 Modifications géométriques	28
1.3.2 Modifications sur la connectivité	31
1.3.3 Fichier : réorganisation des points et triangles	32
1.3.4 Compression	32
1.4 Métriques 3D	33
1.4.1 RMSE, VSNR et Laplacien géométrique	33
1.4.2 Mesure de l’erreur quadrique	33
1.4.3 Distance de Hausdorff	34
1.4.4 Mesure basée sur le volume	35
1.4.5 Distance basée sur les courbes	35
1.4.6 Autres métriques	35
1.5 Acquisition d’objets 3D	36
1.5.1 Méthodes avec lumière structurée	36
1.5.2 Méthodes sans lumière structurée	37
1.5.3 Méthodes hybrides	41
Conclusion	41

2	Dissimulation d'information	43
	Introduction	43
2.1	Différentes approches de dissimulation d'information	44
2.1.1	Cryptographie	44
2.1.2	Stéganographie et insertion de données cachées	45
2.1.3	Tatouage	45
2.2	Évaluation et protocoles des algorithmes de tatouage	46
2.2.1	Evaluation	46
2.2.2	Protocoles de tatouage	48
2.2.3	Tatouage d'images	50
2.3	Tatouage d'objets 3D	51
2.3.1	Méthodes basées sur la réorganisation du fichier de données	51
2.3.2	Méthodes basées sur la connectivité et la topologie	52
2.3.3	Méthodes basées sur des modifications géométriques de l'objet 3D	53
2.3.4	Autres méthodes	58
	Conclusion	59
II	Contributions	61
1	Digitalisation d'objets 3D	65
	Introduction	65
1.1	Contributions à la digitalisation d'objet 3D	65
1.1.1	Choix de la méthode de digitalisation	66
1.1.2	Présentation de la méthode	67
1.1.3	Calibrage de caméra	68
1.1.4	Acquisition, segmentation	73
1.1.5	Reconstruction de la surface de l'objet	74
1.1.6	Récupération de la couleur	76
1.2	Résultats	81
1.3	Proposition d'amélioration de la digitalisation avec la théorie des possibilités	82
1.3.1	Analyse des Défauts	84
1.3.2	Application de la théorie des possibilités à la reconstruction tridimensionnelle par silhouettes	84
	Conclusion	89
2	Tatouage d'objets 3D pour l'enrichissement de contenu	91
	Introduction	91
2.1	Méthode d'insertion basée sur l'ACM	92
2.1.1	Arbre couvrant minimum	92
2.1.2	Sélection et synchronisation des zones d'insertion	95
2.1.3	Insertion des données	98
2.1.4	Contraintes sur le choix des zones d'insertion	100

2.1.5	Extraction du message	104
2.1.6	Résultats	105
2.1.7	Conclusion	112
2.2	Méthode d'insertion basée sur la projection	114
2.2.1	Sélection des zones d'insertions	114
2.2.2	Synchronisation des quadrangles retenus	116
2.2.3	Insertion du message	116
2.2.4	Extraction du message	117
2.2.5	Résultats	119
2.2.6	Conclusion	124
2.3	Comparaison des méthodes	126
2.3.1	Influence du seuil de coplanarité	126
2.3.2	Mesure d'erreur	127
2.3.3	Robustesse et fiabilité	127
2.4	Applications industrielles	128
2.4.1	Insertion d'un logo	128
2.4.2	Insertion des lignes de style	129
2.4.3	Insertion de la texture et de la couleur	129
2.4.4	Vérification de l'intégrité des données	129
	Conclusion	130

Conclusion et perspectives	133
-----------------------------------	------------

Publications de l'auteur	137
---------------------------------	------------

Bibliographie	145
----------------------	------------

Table des figures	147
--------------------------	------------

Introduction Générale

Contexte de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un contrat CIFRE entre la société STRATEGIES localisée à Rungis et le LIRMM (Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier), UMR 5506 CNRS/UM2. La société STRATEGIES a pour principale activité le développement de logiciels pour le design de matériaux souples, principalement la chaussure et le sac à main. La chaîne de fabrication d'une chaussure est présentée afin de mieux comprendre les besoins de l'entreprise. La première étape de la fabrication est la construction de la forme par le formier, le formier travaillant généralement avec le bois. La forme résultante représente le volume intérieur de la chaussure. L'étape suivante est la digitalisation de la forme afin de passer d'un volume physique à un modèle 3D numérique. Le modèle numérique est ensuite travaillé sur ordinateur à l'aide de logiciels développés par la société STRATEGIES. Ces logiciels permettent de faire des opérations de design (ajout de lignes de couture, de textures, de couleurs, etc...) sur le modèle 3D numérique afin de modéliser le produit final. La forme numérique ainsi créée est ensuite envoyée dans les entreprises de production. La Figure 1 illustre la chaîne de fabrication de la chaussure. L'entreprise STRATEGIES englobe les parties design et chaîne de fabrication (en association avec une entreprise de production de machine à découpe de matières souples). La société STRATEGIES développe un logiciel 3D qui permet à l'utilisateur de faire toutes les opérations utiles au passage d'un modèle numérique de forme intérieure à un modèle numérique représentant le produit final. Ce logiciel réalise également la mise à plat des pièces de matières de la chaussure ainsi que le placement automatique des pièces sur la peau utilisée pour la confection de la chaussure. Certains modules de ce logiciel ont été développés en partenariat avec l'équipe ICAR du LIRMM dans le cadre de précédents contrats.

Définition du problème de numérisation 3D

Le logiciel de design a besoin pour travailler d'avoir un objet numérique 3D. Cependant, la partie digitalisation 3D permettant de passer de la forme en bois à la forme numérique n'est pas maîtrisée par l'entreprise STRATEGIES. A l'heure actuelle le passage par une entreprise extérieure de digitalisation est obligatoire afin d'obtenir le modèle numérique 3D nécessaire au travail sur le logiciel de design. La digitalisation est faite par des entreprises ne travaillant pas forcément dans la chaussure, comme des entreprises d'aéronautique, avec des appareils non adaptés à la chaussure car trop sophistiqués, et dont le coût est relativement élevé. Un premier besoin pour l'entreprise

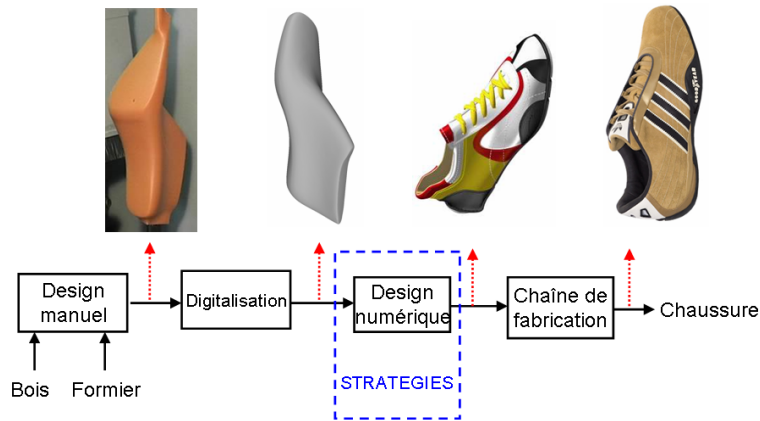


FIG. 1 – Chaîne de fabrication de la chaussure.

serait de pouvoir digitaliser à moindre coût les formes en bois. Un second souhait de l'entreprise serait la récupération des lignes de style sur des modèles en bois travaillés à la main. La digitalisation concerne donc la forme 3D, mais également la texture et la couleur. Avant l'ère du numérique le design de la chaussure se faisait directement sur la forme en bois. Une coque était appliquée sur la forme et les lignes de style étaient tracées au crayon directement sur la coque. Une fois le design fini la coque était décollée et mise à plat pour la découpe du cuir. Au moment de la digitalisation, l'entreprise souhaiterait pouvoir également récupérer les lignes de style en trois dimensions. De cette façon, certains stylistes qui ne souhaitent pas faire ce travail de design de lignes de style sur l'ordinateur à cause du manque de sensation pourrait le faire directement sur l'objet réel et obtenir les lignes au moment de la digitalisation de la forme.

Définition du problème de tatouage 3D

L'entreprise STRATEGIES est intéressée par plusieurs aspects du tatouage d'objets 3D. Une première problématique pour l'entreprise est la protection de la forme. En général les stylistes sont principalement en Europe ou aux États-unis alors que la fabrication des chaussures est faite en Asie ou en Amérique du sud. Les formes numériques originales sont donc envoyées dans ces pays pour la production. Le souci dans ce cas est qu'il est facile de modifier un peu le design de la forme et de concevoir une chaussure presque similaire et cela de manière immédiate. Dans cette problématique l'entreprise a donc besoin de protéger l'objet 3D avant le transfert. Une seconde problématique est de garantir l'intégrité des l'objets 3D avant leur conception afin de s'assurer que l'objet construit correspond bien au modèle donné par le styliste. Enfin l'entreprise STRATEGIES s'intéresse aussi à l'enrichissement d'objets 3D avec des méta données. Dans ce cas le message caché dans l'objet 3D peut être un logo, une texture ou les lignes de style, si la personne possède une clef ou le bon logiciel il est alors possible d'accéder à la 3D avec le logo, la texture ou les lignes sinon seul l'accès à la forme 3D est possible.

Le message peut être aussi un fichier texte contenant des informations sur la forme ou sur le styliste pour faciliter l'archivage des objets 3D.

Plan du manuscrit

Ce manuscrit est composé de deux parties. La première partie est consacrée à l'état de l'art, la deuxième partie est consacrée à nos contributions.

Le chapitre 1 de la première partie présente différents domaines autour de la 3D. Dans un premier temps nous montrerons les différentes modélisations existantes pour représenter un objet 3D. Nous décrivons les principales modifications qui peuvent être effectuées sur les objets 3D. Ensuite, Nous présentons des métriques utilisées pour évaluer les déformations subies par les objets. Enfin nous décrivons différentes techniques de modélisation permettant d'acquérir des objets 3D. Le chapitre 2 introduit la dissimulation d'information en présentant les différentes approches de dissimulation d'information. Toujours dans le chapitre 2, nous présentons comment sont évalués les algorithmes de dissimulation d'information et les différents protocoles utilisés. Enfin nous présentons des méthodes de dissimulation d'information appliquées dans un premier temps aux images puis aux objets 3D.

Dans la seconde partie de ce manuscrit nous présentons nos contributions. Le chapitre 1 présente notre contribution dans la réalisation d'un digitaliseur 3D pour la chaussure. Le chapitre 2 présente nos contributions à la dissimulation d'information dans des objets 3D. Nous détaillerons deux approches proposées afin d'enrichir le contenu des objets 3D sans modifier la position des points.

Nous concluons enfin ce document en évoquant les perspectives potentielles de la digitalisation 3D ainsi que de nos méthodes d'insertion de données dans les objets 3D.

Première partie

État de l'art

Introduction première partie

L'imagerie 3D est née avec les premières peintures en perspective dans le milieu du 15^{ème} siècle. Les peintres s'aidaient alors d'une machine à dessiner en 3D appelée *perspectographe*. La perspective était obtenue par des méthodes graphiques dérivées directement de la géométrie projective. Il a fallu attendre le début des années 1950 et les premiers ordinateurs pour voir apparaître la création d'images de synthèse. Les universités se servirent ensuite de ces images 3D, et en 1967 l'université de l'Utah aux États-Unis se spécialisa dans ce domaine. En particulier les professeurs David C. Evans et Ivan Sutherland essayèrent de modéliser divers objets. En 1975 fut créée une des plus célèbres images de l'infographie, la théière, devenue depuis un objet classique de test pour les applications 3D. Au début des années 1980, l'imagerie 3D se démocratise avec l'arrivée des premiers ordinateurs personnels. C'est à ce moment là que nous avons vu apparaître des simulations de navettes ou de fusées par la NASA ou encore de paysages et de visages. Mais c'est vraiment à partir des années 1990 que la 3D se développe de façon importante, avec notamment l'arrivée de matériel plus puissant permettant de traiter des objets en temps réel et des cartes 3D pour le rendu. Dans cette partie nous allons aborder plusieurs aspects de l'imagerie 3D.

Chapitre 1

Objet 3D : modélisation, modifications, métriques et acquisition

Introduction

Dans ce chapitre nous abordons différents aspects de l'imagerie 3D. Dans un premier temps nous présentons section 1.1 les principales modélisations utilisées pour la représentation des objets 3D. Nous présentons dans la section 1.2 comment passer d'une représentation volumique ou en nuage de points à un maillage triangulé. Une de ces méthodes permettant le passage d'un modèle volumique à une surface triangulée sera utilisée pour la réalisation d'un digitaliseur 3D dans le chapitre 1 de la seconde partie de ce manuscrit. Nous présentons ensuite dans la section 1.3 différentes manipulations possibles des objets 3D. Certaines de ces manipulations peuvent être vues comme une modification normale de l'objet alors que d'autres sont perçues comme des attaques à un système de tatouage. Nous présentons dans la section 1.4 les métriques qui peuvent servir à évaluer les distorsions à des fins de remaillage mais aussi, dans notre cas pour l'évaluation des distorsions apportées par les algorithmes de tatouage. Enfin, nous présentons dans la section 1.5 des méthodes permettant d'acquérir les modèles 3D à partir d'images de l'objet 3D.

1.1 Modélisation géométrique d'objets 3D

La modélisation géométrique est apparue au début des années 1970, elle s'intéresse au design et à la représentation géométrique des objets solides. Les avantages et inconvénients de ces méthodes ont été présentés et discutés par Requicha [Req80], Hoffmann [Hof89] ou encore Rossignac [RR99]. Nous présentons dans cette section les principales méthodes de modélisation géométrique. Nous présentons une première catégorie de modèles non structurés dans la section 1.1.1. Une seconde catégorie de modèles volumiques sera présentée dans la section 1.1.2. C'est cette représentation que nous uti-

liserons par la suite pour réaliser notre digitaliseur 3D. Nous présenterons ensuite une troisième catégorie contenant les modèles surfaciques dans la section 1.1.3. Dans cette catégorie nous trouvons la représentation en maillage triangulé qui est la représentation la plus utilisée par les méthodes d'insertion de données dans des objets 3D. C'est cette représentation qui est utilisée dans nos deux méthodes d'insertion de données présentées dans le chapitre 2 de la seconde partie de ce document.

1.1.1 Modèles non structurés

La première catégorie regroupe les modèles non structurés, leur principale caractéristique est qu'ils ne présentent aucune information de topologie pour lier les éléments formant la surface entre eux.

1.1.1.1 Nuage de points

Le nuage de points est la représentation la plus naturelle d'un objet 3D. Il est constitué d'une liste finie de points avec leurs coordonnées cartésiennes. Ces points représentent la géométrie de l'objet mais ne sont pas connectés entre eux. Le nuage de points est le résultat d'une digitalisation manuelle ou par scanner, d'une reconstruction basée sur l'image ou par échantillonnage d'un autre modèle. En fonction du type de scanner utilisé, d'autres paramètres peuvent y être ajoutés (couleur, réflectance, chaleur, etc.). Cette représentation peut ensuite être maillée afin d'obtenir une surface triangulée, nous aborderons ce problème de changement de modélisation dans la section 1.2. La Figure 1.1 représente un exemple de nuage de points sur un modèle 3D représentant le visage d'une personne.



FIG. 1.1 – Exemple de nuage de points.

1.1.1.2 Surfel

Le terme *surfel* est une abréviation de *SURFace ELement* (élément de surface en français). Le surfel est une surface orientée qui approxime localement la surface de l'objet. C'est une extension du nuage de points qui permet l'affichage de modèles 3D texturés. A chaque point est associé une surface composée d'une normale et une couleur ou une texture. Cette représentation est conçue pour le rendu de modèle 3D sans utilisation de maillage ou d'informations de connexités. La Figure 1.2 illustre une représentation en surfels.

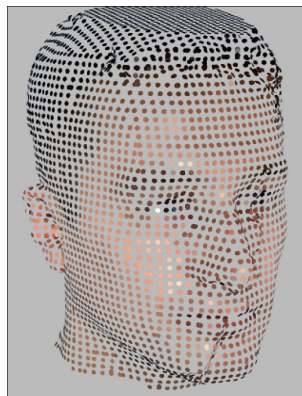


FIG. 1.2 – Exemple de rendu avec l'utilisation de surfels.

1.1.1.3 Soupe de polygones

Comme pour le surfel, la soupe de polygones est un ensemble non structuré de facettes. Il y a donc une topologie locale pour représenter une facette mais aucune topologie liant les facettes entre elles. L'avantage de la soupe de polygones provient du fait que c'est une représentation native de la librairie OpenGL¹ qui permet un affichage de modèles 3D et l'application de texture facile et efficace. Comme pour le surfel la soupe de polygones est surtout utilisée pour l'affichage de modèle 3D.

1.1.2 Modèles volumiques

Ces modèles sont construits à partir de combinaisons de primitives tridimensionnelles (cube, cylindre, sphère, etc.). Il existe différentes représentations de modèles sous la forme de volume. La plus connue est le volume de voxels et son extension l'octree qui sont tous les deux à base de volumes cubiques. Il existe d'autres méthodes, comme l'arbre CSG (Constructive Solid Geometry), qui utilisent toutes sortes de primitives tridimensionnelles.

¹OpenGL (Open Graphics Library) est une spécification qui définit une interface de programmation (Application Programming Interface ou API) multi-plateformes pour la conception d'applications générant des images 3D ou 2D.

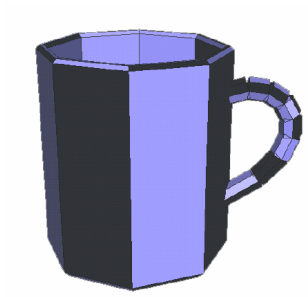


FIG. 1.3 – Exemple de rendu avec une soupe de polygones.

1.1.2.1 Voxels

La voxelisation est la méthode la plus simple et la plus intuitive pour la représentation à base de volumes. Le modèle utilise des éléments volumiques appelés voxel qui vient de *VOLume ELement* (élément de volume en français) pour décrire la forme des objets. La Figure 1.4 illustre une exemple de représentation d'un tore avec des voxels. L'espace de travail est discrétisé à l'aide des voxels. Chaque voxel est repéré dans l'espace par un système de coordonnées paramétriques (x, y, z) et peut prendre une valeur différente selon si le voxel appartient ou non à l'objet. Un inconvénient de la méthode est que pour bien définir les contours d'un objet, la résolution doit être très importante. De ce fait, la taille des voxels doit être petite et le nombre de voxels augmente. Cela a pour effet d'augmenter significativement la taille des fichiers. Par conséquent des approches de compression de données sont nécessaires. L'analyse spatiale du modèle voxel est limitée à des relations d'adjacence, ce qui limite la diversité des opérateurs spatiaux applicables. Il est possible de passer d'une représentation en voxel à une surface triangulée, nous abordons ce problème de changement de modélisation en section 1.2.

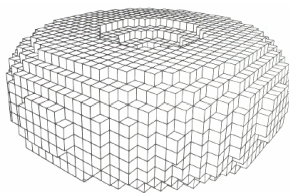


FIG. 1.4 – Exemple de rendu d'un tore avec l'utilisation de voxels.

1.1.2.2 Octrees

Dans les modèles volumiques le modèle octree est une hiérarchisation du modèle voxel. La modélisation par octree permet d'augmenter la résolution dans des zones choisies, en divisant un voxel en plusieurs voxels plus petits. L'espace est alors découpé

en cubes de tailles variables. La représentation de ce découpage est faite à l'aide d'un arbre dont le tronc correspond à l'espace global. A toutes les intersections, l'arbre se divise en huit branches correspondant aux huit divisions du cube initial. Chaque cube possède des paramètres comme la présence ou non de l'objet dans le voxel ou la division ou non du voxel en voxels plus petits. L'utilisation d'octree permet de réduire de façon significative la taille occupée par le fichier en mémoire. La Figure 1.5 illustre un volume représenté sous la forme d'un voxel et l'arbre qui lui est associé.

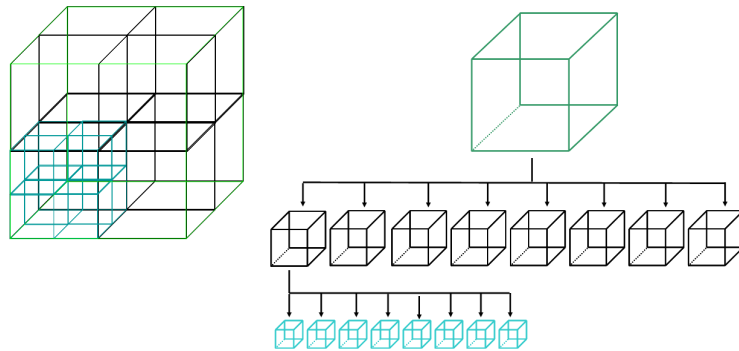


FIG. 1.5 – Découpage d'un objet avec une approche en Octree.

1.1.2.3 Constructive Solid Geometry (CSG)

L'arbre CSG est un système de manipulations et de combinaisons de volumes prédéfinis. Il utilise des primitives volumiques prédéfinies (cube, cylindre, sphère, etc.) et des opérations booléennes (union, intersection, soustraction, etc.) pour construire des objets plus complexes. Les volumes prédéfinis peuvent être modifiés par des transformations géométriques (rotation, translation, homothétie, etc.). L'objet résultant est représenté comme un arbre ayant pour feuilles les primitives considérées, et comme nœuds les différentes opérations booléennes utilisées entre chaque sous-arbre. L'avantage de cette approche est de remplacer une représentation par une unique primitive, souvent trop complexe, par un ensemble de compositions de primitives de nature plus simples. Un exemple d'arbre CSG est illustré Figure 1.6.

1.1.3 Modèles surfaciques

Les modélisations présentées dans les sections précédentes étaient soit sans structure, soit représentées par un volume sur lequel il est possible par la suite de calculer une surface. Les méthodes décrites dans cette partie représentent directement une surface.

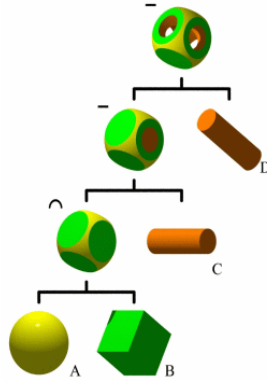


FIG. 1.6 – Exemple d'arbre CSG.

1.1.3.1 Maillages surfaciques

Le maillage surfacique est la façon la plus simple de représenter la surface d'un objet 3D. L'objet est présenté comme un ensemble de polygones composés de faces, d'arêtes et de sommets. Du fait que tout polygone peut être triangulé, le choix a été d'utiliser des triangles pour l'accélération de l'affichage d'objets 3D dans les cartes vidéo. Dès lors le maillage triangulaire est devenu le maillage surfacique le plus utilisé de nos jours pour la représentation de modèles 3D. Une surface triangulée peut être vue comme un couple :

$$\mathcal{M} = (\mathcal{V}, \mathcal{K}), \quad (1.1)$$

où \mathcal{V} est l'ensemble des sommets du maillage, et \mathcal{K} représente la topologie du maillage. La géométrie du maillage correspond au nuage de points \mathcal{V} défini comme l'ensemble :

$$\mathcal{V} = (p_1, \dots, p_n), p_i \in \mathbb{R}^3, 1 \leq i \leq N, \quad (1.2)$$

avec N représentant le nombre de sommets dans le maillage. La topologie \mathcal{K} définit la connexité des sommets, arêtes et faces du maillage. A une surface triangulée est associée généralement sa caractéristique d'Euler-Poincaré, notée \mathcal{X} , qui donne la correspondance entre le nombre de composants de chaque entité du maillage (sommets, arêtes, faces) :

$$\mathcal{X}(\mathcal{M}) = N - A + F, \quad (1.3)$$

où A représente le nombre d'arêtes et F le nombre de faces du maillage. De façon informelle, un maillage est une variété ou *manifold* si toutes ses faces sont des faces simples. Par définition, un maillage est une variété si il satisfait les trois conditions suivantes :

- Propriété de disque local : en chaque point du maillage il existe une sphère de rayon non nul telle que l'intersection entre la sphère et le maillage est homothétique à un disque.

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

Les maillages possèdent l’avantage de pouvoir représenter des objets 3D de formes complexes. Il est aussi possible de passer de n’importe quelle autre représentation à un maillage. Nous présenterons dans la section 1.2 plusieurs de ces méthodes. La limitation du maillage vient du fait qu’il requiert un stockage explicite pour chaque élément non seulement pour sa géométrie mais aussi pour sa topologie. Il est considéré comme l’approximation d’une surface et peut demander un volume important de données afin de représenter précisément des surfaces courbes. La Figure 1.7 illustre le maillage triangulé d’une forme intérieure de chaussure.

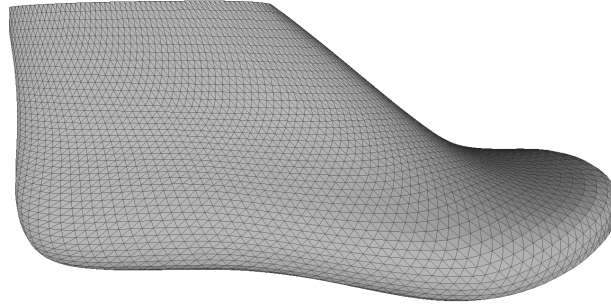


FIG. 1.7 – Exemple de maillage sur une forme intérieure de chaussure.

1.1.3.2 Surfaces implicites

Une surface implicite est définie comme l’ensemble des points P qui satisfont l’équation $f(P)$, où P est un point dans l’espace de dimension n et f une fonction scalaire de $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. A tout point $P(x_p, y_p, z_p)$ de l’espace \mathbb{R}^3 est associé une valeur de potentiel C_p . Une surface implicite est alors définie par l’ensemble des points de \mathbb{R}^3 pour lesquels la fonction f associe la même valeur de potentiel C_0 . Par définition, la surface implicite ne permet pas de calculer directement les points de la surface. La propriété principale des surfaces implicites est la propriété de *classification d’un point* qui permet de définir complètement le volume. Pour tout point P de l’espace il est possible de déterminer si P est à l’intérieur, à l’extérieur ou sur la surface en fonction de la valeur de $f(P)$:

$$\begin{aligned}
 &\text{Si } f(P) > C_0 \text{ le point } P \text{ est à l’extérieur du volume.} \\
 &\text{Si } f(P) < C_0 \text{ le point } P \text{ est à l’intérieur du volume.} \\
 &\text{Si } f(P) = C_0 \text{ le point } P \text{ est sur la surface de l’objet modélisé.}
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Les surfaces implicites permettent d’obtenir des surfaces ayant de bonnes propriétés de continuité. Ces propriétés sont intéressantes dans le cas de reconstruction à partir de

contours où les objets à reconstruire ont une forme dite douce, ne possédant pas de fortes courbures. La propriété de classification permet de faciliter les processus de détection de collision : deux surfaces implicites s'intersectent si au moins un point appartenant à l'une des surfaces est inclus dans l'autre.

1.1.3.3 Surfaces paramétriques

Les courbes et surfaces paramétriques les plus utilisées sont les surfaces de Béziérs, les B-Splines et les NURBS (Non Uniform Rational B-Splines). La forme générale d'une surface paramétrique est définie par :

$$S(u, v) = \begin{bmatrix} f(u, v) \\ g(u, v) \\ h(u, v) \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

où u et v sont les variables paramétriques et f, g et h des fonctions de $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. La représentation paramétrique la plus utilisée pour modéliser des surfaces courbes est la NURBS (Non Uniform Rational B-Spline). Les NURBS sont des outils de modelage qui se présentent sous la forme de courbes calculées à partir de l'extrapolation de quelques points de contrôle. Contrairement aux courbes de Béziérs, il est possible d'en modifier localement l'apparence en déplaçant certains points ou noeuds de contrôle. Ces noeuds ne sont pas distribués de manière homogène (*Non uniform*) et possèdent un poids (*rational*) qui intervient dans le calcul d'ensemble de la courbe. La possibilité de déplacer ces points et d'en modifier le poids permet de créer des formes d'une grande complexité avec assez peu d'éléments de contrôle. Les surfaces NURBS sont construites à partir de B-Splines monodimensionnelles. Une surface NURBS est définie par l'équation paramétrique :

$$S_{NURBS} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} * R_{i,j,k,l}(u, v), \quad (1.6)$$

où les coefficients $R_{i,j,k,l}(u, v)$ représentent les fonctions de bases B-Splines d'ordre k et l , et $P_{i,j}$ les points de contrôle exprimés en coordonnées homogènes. L'avantage des NURBS est qu'elles sont faciles à échantillonner ce qui permet d'évaluer de façon exacte et directe des points de la surface et de ses dérivées. La relation entre le polyèdre de contrôle et la surface finale permet une modélisation intuitive et naturelle. La Figure 1.8 illustre la représentation d'une surface sous forme de NURBS.

1.1.3.4 Surfaces de subdivision

Les surfaces de subdivision sont un autre type de surface paramétrique. Une surface de subdivision est définie par un maillage de contrôle qui est itérativement affiné en utilisant une méthode de subdivision. A partir d'un maillage polygonal basse résolution ou grossier M_0 appelé réseau de contrôle initial, l'application de règles de raffinement génère une suite de maillages de points de contrôle M_1, \dots, M_i plus fins à chaque opération qui convergent vers une surface lisse M_∞ appelée surface limite. Il y a deux sortes

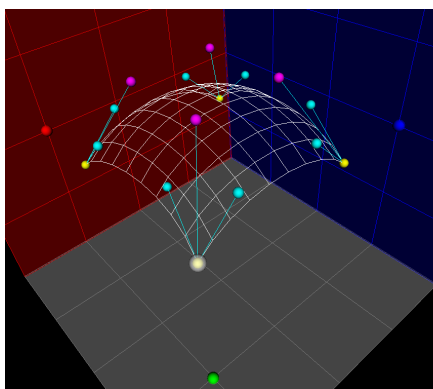


FIG. 1.8 – Exemple de surface NURBS.

de principes de subdivision : les principes qui reposent sur l'interpolation où les points de contrôle sont situés sur la courbe (par exemple le principe de Butterfly [DLG90]) et ceux d'approximation où les points de contrôle ne sont pas situés sur la courbe (par exemple le principe de Loop [Loo87]). Ces règles sont divisées en deux catégories : les règles géométriques qui déterminent les positions des points de contrôle du nouveau maillage à partir de ceux du maillage précédent et les règles de partage topologique qui décrivent le raffinement de la connectivité du polyèdre de contrôle et spécifient par conséquent les propriétés de la surface. La Figure 1.9 illustre plusieurs étapes de division de la surface originale.

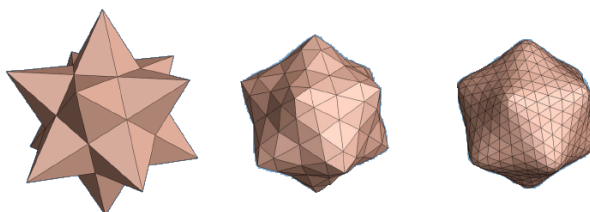


FIG. 1.9 – Méthode de subdivision de Loop. A gauche le maillage original, à droite les maillages après 1 et 2 étapes de subdivision.

Synthèse sur la modélisation géométrique d'objets 3D

Dans cette section nous avons présenté différentes modélisations 3D. Il est à noter que la modélisation en maillage triangulé est la plus utilisée pour la représentation d'objets 3D et donc la majorité des méthodes de tatouage travaille sur cette modélisation. Dans le Tableau 1.1 nous récapitulons les différents avantages et inconvénients des catégories de modélisations présentées.

Modélisations	Avantages	Inconvénients
Non-structurés	<p>Simple</p> <p>Rapidité de visualisation</p> <p>Nécessite peu de puissance de calcul</p>	<p>Pas de distinction entre le vide et le plein</p> <p>Possibilité de créer des solides sans aucun sens physique</p> <p>Impossible d'effectuer certains calculs (calcul de la masse, par exemple)</p>
Volumiques	<p>Facilité de décomposition à l'aide d'opérateurs logiques de base</p> <p>Facilité de visualisation</p> <p>Facilité d'obtention à partir d'un autre modèle</p> <p>Facilité de calcul des propriétés géométriques et physiques</p>	<p>Difficulté d'effectuer des opérations géométriques</p> <p>Représentation approximative des objets</p>
Surfaciques	<p>Facilités de description de visualisation et de transformations géométriques</p>	<p>Difficultés de réalisation des opérations logiques dues au grand nombre de faces</p> <p>Difficultés de validation, les faces ne constituent pas toujours un volume</p> <p>Absence d'algorithmes généraux</p>

TAB. 1.1 – Avantages et inconvénients des différentes catégories de modélisation.

1.2 Changement de modélisation

Nous avons présenté dans la section 1.1 différentes façons de représenter les modèles 3D. Dans cette section nous allons présenter des méthodes permettant de passer d'une représentation volumique ou d'un nuage de points à un maillage triangulé. Nous avons choisi ces deux transformations du fait que le maillage triangulé est la modélisation la plus utilisée pour la représentation de surface. Notons également que le maillage triangulé est le support principal des algorithmes de tatouage 3D. De plus nous utilisons dans notre contribution de digitalisation de formes 3D une méthode permettant de passer d'une représentation volumique à un maillage 3D.

1.2.1 Du modèle volumique au maillage triangulé

La méthode la plus répandue pour passer d'un volume de voxels à un maillage triangulé est le *Marching Cubes* [LC87]. Cette méthode vient d'une méthode 2D pour déterminer un modèle polygonal à partir d'une iso-surface 2D appelé *Marching Square*. La méthode est basée sur le voxel qui est le cube unité. Le voxel est composé de huit sommets, chaque sommet peut être considéré comme étant à l'intérieur ou à l'extérieur du volume, il leur est donc associée une valeur binaire 0 pour à l'extérieur et 1 pour à l'intérieur. Le cube possède huit sommets, il y a donc $2^8 = 256$ configurations possibles qui sont autant de façons pour une surface d'intersecter les arêtes du volume. Chaque configuration correspond à un ensemble de facettes tracées à l'intérieur du volume, mais la présence de nombreux cas symétriques permet de se ramener à 15 configurations de base. La Figure 1.10 montre une configuration avec deux sommets en dehors de la surface, pour calculer sa configuration il est associé à chaque sommet un bit d'un octet, ce qui donne pour le voxel représenté $00100100 = 2^5 + 2^2 = 36$.

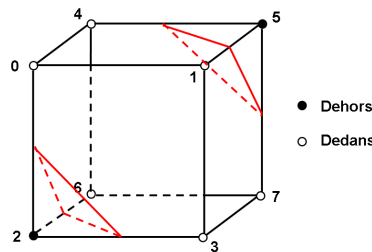


FIG. 1.10 – Exemple de configuration d'un voxel.

1.2.2 Du nuage de points au maillage triangulé

Les données en entrée sont ici un nuage de points P_i provenant d'une surface inconnue S , le but est de construire une surface polygonale qui approxime S topologiquement et géométriquement. Il y a deux approches pour la reconstruction de surface à partir de nuage de points. La première approche est combinatoire, elle consiste à construire

une structure de données spécifique depuis le nuage de points, comme sa triangulation de Delaunay [Del34], puis à extraire de cette structure de données un polygone se rapprochant de la surface S . La triangulation de Delaunay de S est l'unique triangulation de S dont tout simplex admet une boule circonscrite qui ne contient aucun point de S (à part les sommets du simplex). La Figure 1.11.a illustre la triangulation de Delaunay. Le dual de la triangulation de Delaunay est le diagramme de Voronoï [Vor08].

Le diagramme de Voronoï d'un ensemble S de n points de \mathbb{R}^m est une partition de l'espace en n cellules représentant les zones d'influence des points de S : la cellule de Voronoï d'un point x de S est constituée de l'ensemble des points les plus proches de x que tout autre point de S . La Figure 1.11.b illustre une partition de Voronoï. Plusieurs algorithmes ont été proposés sur cette approche [AB98].

La seconde approche consiste à utiliser le nuage de points P_i pour définir une fonction implicite f' . Le premier algorithme est proposé par Hoppe *et al.* [HDD⁺92], il se base, pour reconstruire le maillage, sur un arbre couvrant minimum (ACM) puis sur le calcul de plans tangents. D'autres algorithmes ont été proposés depuis comme ceux basés sur les voisins naturels [BC01] ou sur les moindres carrés [DS05].

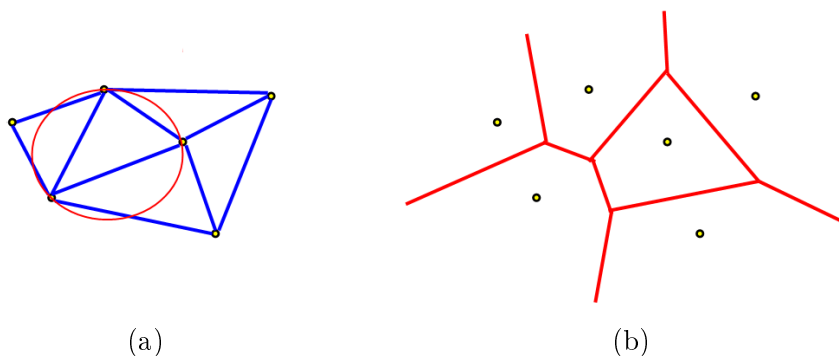


FIG. 1.11 – a) Triangulation de Delaunay, b) Diagramme de Voronoï.

1.3 Modifications des modèles 3D

Dans cette section nous montrons les principales modifications que peut subir un maillage 3D. Certaines de ces modifications sont dites normales alors que d'autre représentent des attaques auxquelles les algorithmes de tatouage tentent de résister. Ces modifications sont séparées en quatre catégories : les modifications géométriques 1.3.1, les modifications de topologie 1.3.2, les modifications qui affectent le fichier 1.3.3 et une dernière catégorie qui regroupe la compression et le changement de format 1.3.4.

1.3.1 Modifications géométriques

Les modifications les plus courantes sont les modifications géométriques, elles sont tirées des méthodes usuelles en traitement des images et étendues à la 3D.

1.3.1.1 Transformations affines

Les transformations affines sont considérées comme des modifications normales de l'objet. Les méthodes d'insertion de données même dites fragiles doivent être capables d'y résister. Les transformations incluses sont les translations, les rotations, les changements d'échelle uniforme et toutes les combinaisons de ces trois opérations. Des exemples de transformations affines sont illustrés Figures 1.12.

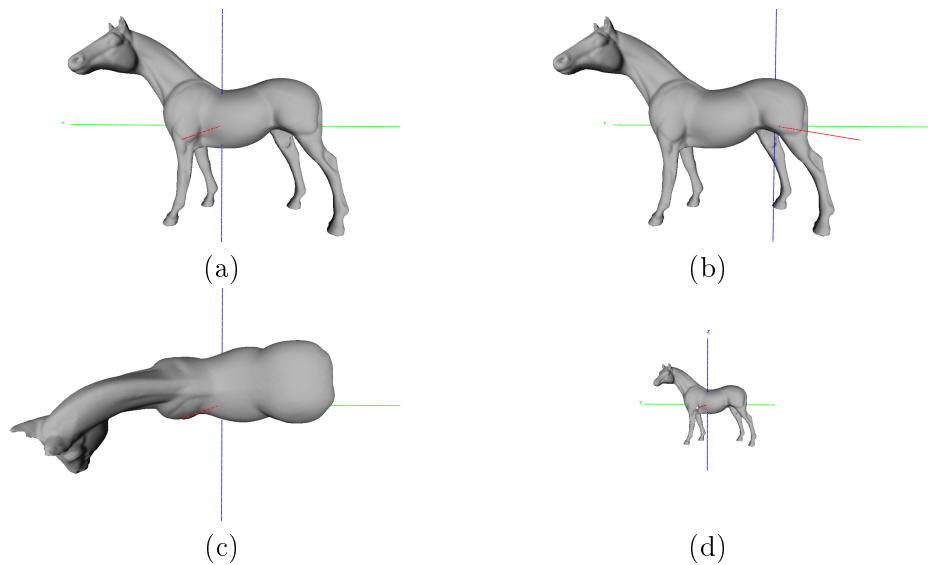


FIG. 1.12 – a) Modèle original, b) translation, c) rotation, d) changement d'échelle.

1.3.1.2 Bruit et lissage

Un maillage peut être considéré comme un signal dans un espace à trois dimensions. Il est donc possible d'utiliser les techniques traditionnelles de traitement du signal à une dimension pour des maillages 3D. Une première modification possible est l'ajout de bruit. Pour un maillage cela ce traduit par l'addition d'un bruit aléatoire sur chaque composante (x, y, z) des sommets du maillage 3D. La Figure 1.13.a représente le modèle original, un exemple de bruitage de modèle 3D est illustré Figure 1.13.b. Une autre modification possible est le lissage ou *smoothing* : cette technique permet d'enlever le bruit sur la surface pour lui donner une apparence plus lisse. Par exemple, le lissage par Laplacien modifie la position d'un point le long de sa médiane en faisant la moyenne des vecteurs à ses sommets voisins. La Figure 1.13.c illustre un exemple de lissage sur un modèle 3D. L'inverse du lissage est le rehaussement ou *Enhancement* qui lui aussi représente une modification sur le maillage 3D. La Figure 1.13.d illustre un exemple de rehaussement. Les modifications précédentes peuvent être représentées dans le domaine spectral comme des modifications des hautes fréquences du modèle 3D. D'autres modifications dans le domaine spectral peuvent toucher les moyennes ou les basses fréquences

comme la quantification par exemple.

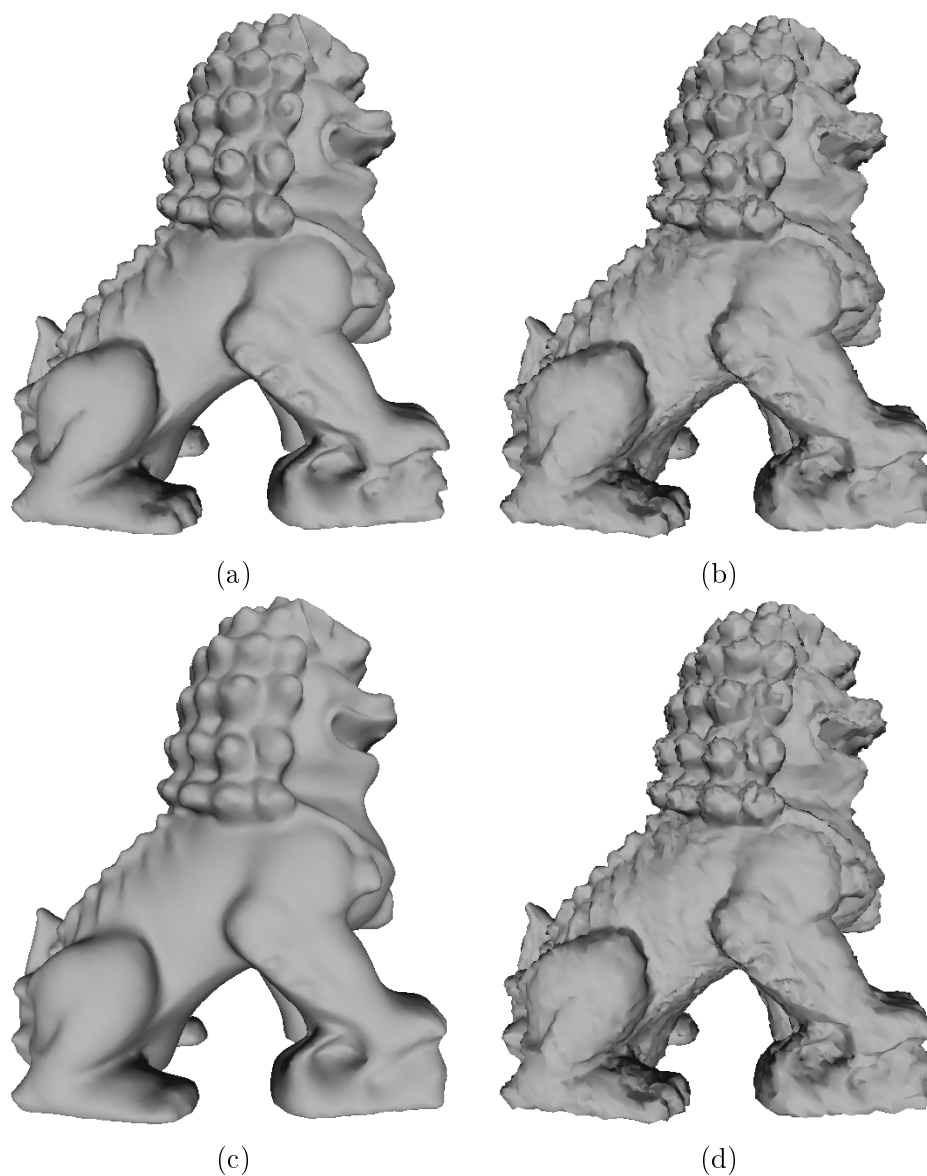


FIG. 1.13 – a) Modèle original, b) Ajout de bruit, c) Lissage, d) Rehaussement.

1.3.1.3 Déformations locales

Les déformations locales sont des variations géométriques locales du modèle 3D. Ces déformations peuvent être du bruit, du lissage, du rehaussement mais aussi d'autres manipulations géométriques. Ces déformations même invisibles ont un impact important surtout sur les processus de synchronisation. La synchronisation peut être par exemple

le classement des points du modèle dans une liste. Si les points sont classés par rapport à leur coordonnées, une déformation locale de la forme perturbe le classement de ces points et donc la synchronisation. La Figure 1.14.a représente le modèle original et la Figure 1.14.b est un exemple de déformation locale. La modification la plus forte de cette catégorie est le fenêtrage (*cropping*) qui consiste à couper une partie du modèle 3D comme illustré Figure 1.14.c. Elle peut être apparentée à une déformation locale du modèle mais aussi comme une modification sur la connectivité. Une solution à ces modifications consiste à partitionner le modèle 3D en patchs surfaciques avec des contraintes sur la création de patchs indépendants des déformations locales. Des exemples de déformations locales sont illustrés Figure 1.14.

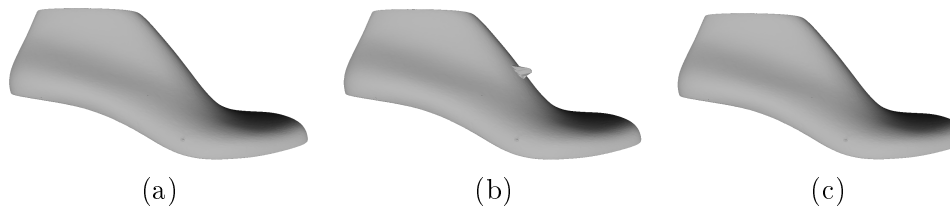
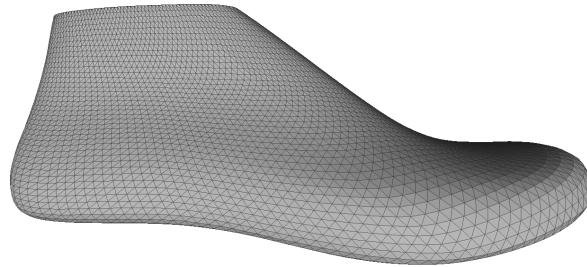


FIG. 1.14 – a) Modèle original, b) Modèle avec déformation locale, c) Modèle avec un fenêtrage.

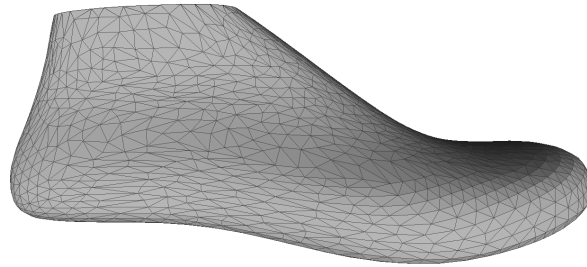
1.3.2 Modifications sur la connectivité

Les modifications sur la connectivité regroupent le remaillage, la simplification de maillage ou encore la subdivision de maillage :

- Il existe deux approches en remaillage, la première consiste à modifier le maillage déjà existant, la seconde supprime le maillage existant pour en créer un nouveau. Un exemple de remaillage est illustré Figure 1.15, la Figure 1.15.a représente le modèle avec le maillage original et la Figure 1.15.b le modèle remaillé.
- Au début de l'imagerie 3D, la manipulation d'objet 3D de grande taille posait un problème. Il a donc fallu chercher des méthodes pour réduire la taille des objets 3D tout en conservant un bon aspect visuel. En observant que la suppression de points ou d'arêtes dans des zones bien précises ne détériorait pas le rendu de l'objet 3D, des méthodes de simplification de maillage ou décimation sont apparues. Il existe deux catégories d'algorithmes de décimation, celle basée sur les sommets et celle basée sur les arêtes.
- La subdivision de maillage est l'inverse de la simplification dans le sens que le nombre de points augmente et donc également le nombre d'arêtes dans le modèle 3D. Un aperçu des différentes techniques de subdivision de maillage est présenté en section 1.1.3.4. Une solution pour être robuste à ces modifications est de faire en prétraitement un remaillage du modèle 3D.



(a)



(b)

FIG. 1.15 – a) Maillage original, b) Remaillage.

1.3.3 Fichier : réorganisation des points et triangles

Les modèles 3D basés sur le maillage sont souvent représentés par une liste ordonnée de sommets et une liste de triangles. La liste de triangles peut être représentée par une série de trois indices sur la liste de sommets. L'ordre des sommets et des faces dans un modèle 3D est arbitraire et la modification de cet ordre n'affecte en rien la forme du modèle 3D. Les perturbations sur la réorganisation des données consistent à modifier l'ordre des points ou des triangles dans le fichier représentant le modèle 3D. Ces modifications visent les méthodes de tatouage qui utilisent l'index des sommets ou des faces pour synchroniser le message avec l'objet et qui sont donc sensibles à la réorganisation du fichier. La plupart des méthodes actuelles de tatouage n'utilisent plus cette information.

1.3.4 Compression

La compression est présentée ici sous deux aspects bien distincts, le changement de format et la compression. Les compressions directes sont par exemple les ondelettes [VP04] ou les surfaces de subdivision [LDB05]. Alliez et Gotsman décrivent en détail ces approches [AG05]. Le changement de format peut représenter aussi une forme de compression. Par exemple le passage d'un modèle représenté par une liste de sommets et une liste de faces à un modèle NURBS peut être considéré comme une compression.

Il existe des algorithmes de tatouage qui s'insèrent dans des méthodes de compression comme les ondelettes ou dans des représentations particulières comme les NURBS mais il est particulièrement difficile de résister à un changement de format voir plusieurs changements successifs de format.

1.4 Métriques 3D

Dans cette partie nous présentons les métriques les plus utilisées pour évaluer les déformations sur les surfaces. Ces métriques étaient utilisées au départ pour la simplification de maillage ou la compression mais elles s'appliquent aussi pour le calcul de distorsion dans le cas d'un tatouage de l'objet 3D. Certaines de ces méthodes comme la distance de Hausdorff sont codées dans le logiciel Metro [CRS98].

1.4.1 RMSE, VSNR et Laplacien géométrique

Ces méthodes de calcul de distance 3D sont utilisées pour comparer deux maillages ayant la même connectivité. Les deux premières métriques RMSE (Root Mean Square Error) et VSNR (Vertex Signal to Noise Ratio) consistent à additionner les distances euclidiennes entre les points des maillages M_1 et M_2 correspondant :

$$RMSE = VSNR = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} d(a_i, b_i), \quad (1.7)$$

où N est le nombre de points dans M_1 et M_2 , $d()$ la distance euclidienne dans l'espace 3D, a_i et b_i les points des maillages M_1 et M_2 respectivement. Une autre méthode consiste à capturer le lissage local du maillage en utilisant le Laplacien géométrique :

$$GLD(M_1, M_2) = \frac{1}{2N} \left(\sum_{i=0}^{N-1} \|a_i - b_i\| + \sum_{i=0}^{N-1} \|GL(a_i) - GL(b_i)\| \right), \quad (1.8)$$

$$GL(a_i) = a_i - \frac{\sum_{j \in N(a_i)} l_{ij}^{-1} a_j}{\sum_{j \in N(a_i)} l_{ij}^{-1}}, \quad (1.9)$$

où $N(a_i)$ sont les voisins de a_i dans le maillage et l_{ij} la distance euclidienne entre a_i et a_j . L'avantage de cette métrique est quelle différencie le bruit aléatoire sur les sommets et la mauvaise qualité due à la reconstruction. Le système visuel humain (SVH) est très sensible au lissage local de la surface, cette mesure augmente dans le cas d'une perturbation locale détectée par le Laplacien géométrique. Cependant, ces paramètres 3D basés sur les distances de point à point ne permettent pas de voir toutes les distorsions de la forme 3D comme par exemple un changement de connectivité.

1.4.2 Mesure de l'erreur quadrique

La mesure de l'erreur quadrique QEM (Quadric Error Measure) est une métrique mise au point par Garland et Heckbert pour mesurer les modifications faites sur les

arêtes [GH97]. Si un point p_i , appartenant à un plan de normale \vec{n} et de constante d , est remplacé par un point p'_i alors l'erreur commise $E(p_i)$ est calculée comme étant la distance au carré du point au plan :

$$\begin{aligned} E(p'_i) &= (\vec{n}^T p'_i + d)^2, \\ &= p_i'^T (\vec{n}\vec{n}^T) p'_i + 2d\vec{n}^T p'_i + d^2, \\ &= p_i'^T A p'_i + 2b^T p'_i + c. \end{aligned}$$

Finalement l'erreur commise entre le point original p_i et le point modifié p'_i est calculée comme la somme des erreurs commises par rapport aux plans des facettes du voisinage de p_i . La Figure 1.16 illustre la mesure de l'erreur quadrique.

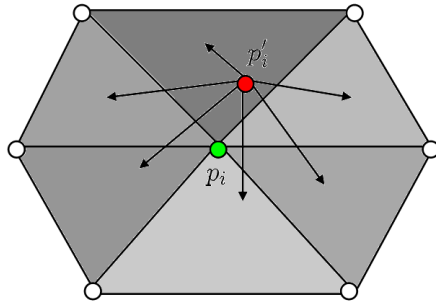


FIG. 1.16 – Représentation de l'erreur quadrique.

1.4.3 Distance de Hausdorff

La distance euclidienne entre un point x et un ensemble $Y \in \mathbb{R}^n$ est définie par :

$$d(x, Y) = \inf_{y \in Y} d(x, y), \quad (1.10)$$

où $d(x, y)$ est la distance euclidienne entre deux points de \mathbb{R}^n . En utilisant cette définition, la distance $d_E(X, Y)$ d'un ensemble X à un autre ensemble Y est :

$$d_E(X, Y) = \sup_{x \in X} d(x, Y). \quad (1.11)$$

Cette distance est appelée la distance de Hausdorff dans une direction entre l'ensemble X et l'ensemble Y . Cependant cette mesure de distance n'est pas symétrique, en général $d_E(X, Y) \neq d_E(Y, X)$. Afin de se ramener à une mesure symétrique, une nouvelle distance est calculée de la forme :

$$H_{max}(X, Y) = \max\{d_E(X, Y), d_E(Y, X)\}. \quad (1.12)$$

Cette métrique est généralement appelée erreur géométrique maximum. Si la distance de Hausdorff entre la triangulation T et la triangulation initiale S est inférieure à une borne prédéfinie ε alors

$$\forall x \in T \text{ il existe un } y \in S \text{ tel que } d_E(x, y) < \varepsilon, \quad (1.13)$$

et

$$\forall y \in S \text{ il existe un } x \in T \text{ tel que } d_E(x, y) < \varepsilon. \quad (1.14)$$

Il existe une autre définition de la distance de Hausdorff entre deux maillages 3D appelée erreur géométrique moyenne :

$$H_{moyenne}(M_1, M_2) = \frac{1}{A_{M_1} + A_{M_2}} \left\{ \int_{a \in M_1} \min_{b \in M_2} d(a, b) + \int_{b \in M_2} \min_{a \in M_1} d(a, b) \right\}, \quad (1.15)$$

où A_{M_1} et A_{M_2} sont les aires des maillages M_1 et M_2 respectivement. Cette métrique est mieux corrélée au SVH pour les maillages similaires, garantissant une erreur spécifique liée entre deux maillages.

1.4.4 Mesure basée sur le volume

La première métrique basée sur le volume a été développée par Alliez *et al.* [ALSS99]. Après une simplification géométrique, cette méthode minimise le volume entre le maillage simplifié et le maillage original en utilisant un algorithme d'optimisation basé sur le gradient et un modèle implicite d'interpolation basé sur le maillage.

1.4.5 Distance basée sur les courbes

La première approche de métrique basée sur les courbures a été proposée par Kim *et al.* [KKK02]. Leur approche a été motivée par le fait que le SVH est sensible aux changements de courbures. La méthode consiste à décomposer l'erreur locale en trois composantes distinctes : la distance, la courbure tangentielle et la courbure discrète. L'équation pour une arête e du maillage est donnée par :

$$E(e) = f(e) + f_1(e) + f_2(e), \quad (1.16)$$

où $f(e)$ est une mesure de l'erreur quadratique, $f_1(e)$ est une fonction d'erreur tangentielle basée sur la magnitude de la différence entre les vecteurs normaux des faces incidentes à e et $f_2(e)$ est une fonction discrète sur l'erreur de courbure.

1.4.6 Autres métriques

Il existe d'autres méthodes plus récentes pour mesurer les déformations sur des objets 3D comme la minimisation d'énergie introduite par Alface et Macq [RAM06] ou une méthode basée sur les similitudes visuelles entre les maillages 3D de Lavoué *et al.* [LDGD+06].

1.5 Acquisition d'objets 3D

Nous avons présenté dans les sections précédentes différentes façons de modéliser des objets 3D. Dans cette section nous présentons des méthodes permettant d'acquérir les modèles 3D à partir d'images de l'objet 3D. Les techniques d'acquisition 3D essaient de retrouver l'intégralité de la structure 3D d'un objet ou d'une scène. Parmi les techniques d'acquisitions 3D, deux groupes principaux sont à distinguer : les méthodes actives présentées section 1.5.1 et les méthodes passives présentées section 1.5.2. Le schéma 1.17 illustre les différentes techniques d'acquisition.

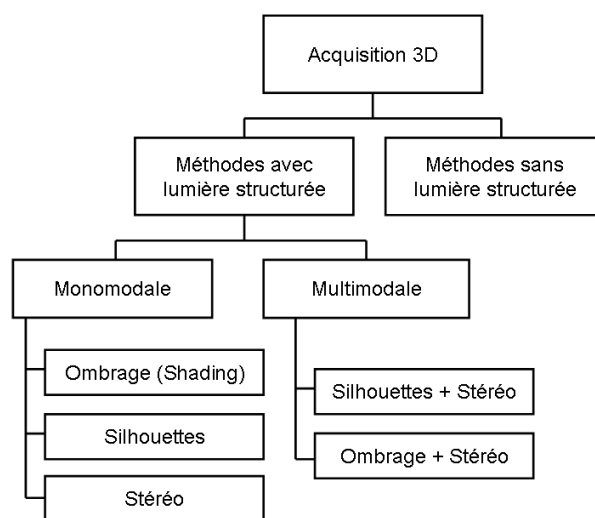


FIG. 1.17 – Aperçus des méthodes d'acquisition d'objets 3D.

1.5.1 Méthodes avec lumière structurée

Les systèmes actifs interagissent avec la scène à numériser. Dans ce sens ils sont composés d'un émetteur qui projette sur la scène à numériser une source d'énergie de type onde lumineuse, laser ou bien électromagnétique. Le résultat de l'interaction avec l'objet numérisé est mesuré à l'aide de récepteurs. La connaissance des caractéristiques des éléments d'émission et de réception permet de reconstituer l'information 3D. Les systèmes actifs présentent l'avantage d'être bien plus indépendants des conditions d'éclairage et de contraste du lieu de mesure.

1.5.1.1 Acquisition par lasers

Une première approche consiste à utiliser des lasers. Les scanners lasers projettent des primitives (point, lignes) dans des directions connues. La lumière réfléchiée par l'objet est récupérée par le détecteur, les positions des points peuvent ainsi être très précisément calculées. Il est nécessaire de répéter l'opération dans différentes directions afin

de couvrir l'ensemble de la scène. Le nuage de points 3D résultant de ces méthodes est extrêmement précis [SBD86, CL96, LPC⁺00].

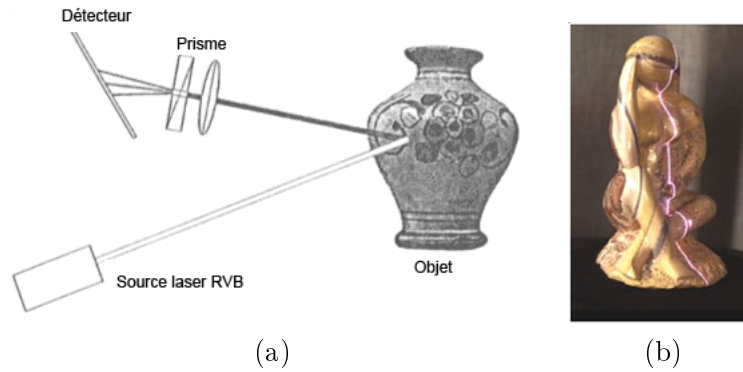


FIG. 1.18 – a) Illustration d'acquisition par laser point, b) Exemple d'utilisation d'un laser plan sur un objet 3D.

1.5.1.2 Autres méthodes de lumières structurées

Une seconde approche utilise des motifs 2D lumineux projetés sur l'objet à reconstruire. Une technique proposée par Cho *et al.* consiste à prendre deux photographies prises sur le même angle avec deux éclairages différents [CSO97]. Son principe consiste à utiliser un modèle associant le niveau de gris de l'image à la pente de la surface analysée. Les résultats présentent une faiblesse : la modélisation de la relation entre niveau de gris et pente n'est pas réaliste du fait que la perspective n'est pas prise en compte. Une seconde technique proposée par Doncescu *et al.* consiste également à prendre deux photographies avec deux éclairages différents [DBQ97]. Dans cette méthode la première photographie est utilisée pour projeter un motif lumineux de structure connue et la seconde photographie est nécessaire pour avoir une image sans les motifs lumineux. En analysant la déformation du motif dans l'image, il est possible de reconstruire le relief. La Figure 1.19 illustre un exemple de reconstruction basée sur la lumière structurée. Il existe des appareils comme le Minolta 3D1500, qui permettent de projeter sur la scène des bandes de lumière colorées et qui calculent automatiquement le relief de la scène. La difficulté de la méthode réside dans l'étape délicate de la segmentation des motifs.

1.5.2 Méthodes sans lumière structurée

Les systèmes passifs utilisent l'énergie ambiante dont ils mesurent l'intensité réfléchie par la surface de l'objet numérisé. La réception de l'énergie réfléchie se fait à l'aide d'un système de vision ou d'acquisition généralement composé de plusieurs caméras [SCMS01]. Ces systèmes sont de fait très tributaires des conditions ambiantes et en particulier du contraste et de l'éclairage du lieu de mesure. Les méthodes passives peuvent être classifiées en trois familles selon le type d'information qu'elles utilisent.

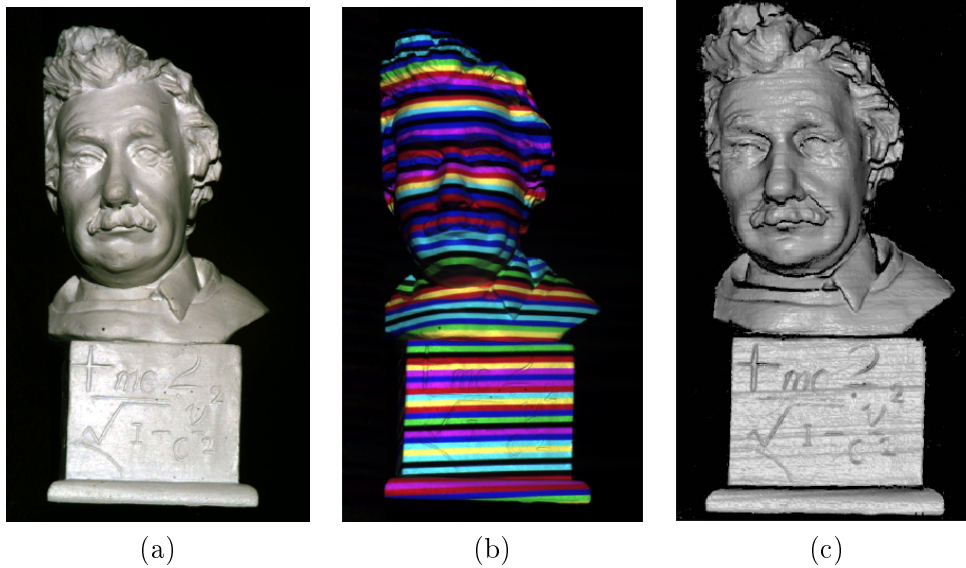


FIG. 1.19 – a) Photographie de l’objet réel, b) Photographie de l’objet avec lumière structurée, c) Objet 3D modélisé.

1.5.2.1 Acquisition par stéréovision

La stéréovision passive est basée sur l’acquisition de deux images (gauche et droite) de la même scène. Connaissant deux points correspondants m_1 et m_2 sur ces deux images, il est possible de retrouver la position du point 3D M qui se projette sur les deux plans rétiniens des caméras en m_1 et m_2 [FK98, Han89]. Le calcul du point M est fait par intersection des deux rayons optiques qui joignent les centres des caméras aux points 2D m_1 et m_2 . Cette opération est appelée triangulation. Le point M est l’intersection de C_1m_1 et de C_2m_2 où C_1 et C_2 sont les centres des caméras. C’est le principe de base de la stéréovision. La triangulation nécessite que les caméras soient calibrées, cependant même en ignorant les matrices de projection des caméras, il est possible de fournir des contraintes sur la position d’un point de la première image se projetant dans la seconde image. Cette contrainte est appelée contrainte épipolaire. Elle signifie que le point m_2 doit être situé sur la projection de la ligne C_1m_1 sur le plan rétinien de la deuxième caméra. La droite des correspondants potentiels de m_1 dans l’image 2 est appelée droite épipolaire de m_1 . Les intersections de la droite (C_1C_2) avec les plans rétiniens définissent les épipoles e_1 et e_2 des caméras 1 et 2. les droites épipolaires dans une image s’intersectent à l’épipole. Le plan épipolaire est formé par les points C_1 C_2 et M . La Figure 1.20 illustre le principe de la stéréovision.

1.5.2.2 Acquisition par silhouettes

Une autre classe de modélisation utilisant les silhouettes des objets dans les images est constituée par les méthodes de *Shape from silhouette*. Une première utilisation des

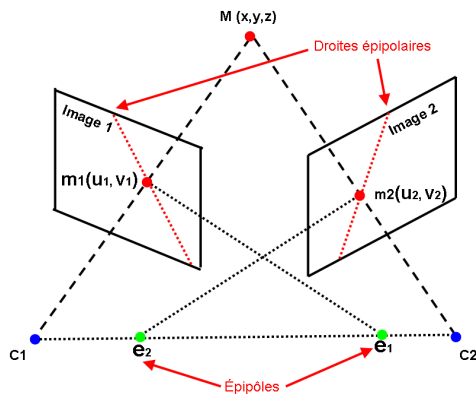


FIG. 1.20 – Principe de la stéréovision.

silhouettes pour la modélisation 3D est présentée dans la thèse de Baumgart [Bau74]. Baumgart propose de construire la surface définie par un jeu de silhouettes en utilisant un polyèdre. A partir de ces travaux, une grande variété de méthodes est apparue pour la reconstruction de modèles 3D basées sur les silhouettes, comme l'octree [Pot87], la projection perspective [VF92] ou l'utilisation de courbes triangulaires (*splines*) [SP98]. Les propriétés théoriques des surfaces définies par un jeu de silhouettes ont été étudiées par Laurentini avec la définition du concept d'enveloppe visuelle (*visual hull*) en 1994 [Lau94]. Il y est montré que le *visual hull* est une borne supérieure de l'objet réel, et qu'il offre une meilleure approximation que l'enveloppe convexe. Considérons un objet positionné dans l'espace, photographié simultanément par n appareils photo. Il est alors possible de définir n silhouettes différentes de cet objet. Si un point est inclus dans le volume de l'objet, il se projette dans toutes les silhouettes (par définition). Mais la réciproque est fautive : un point qui se projette dans toutes les silhouettes n'est pas forcément un point de l'objet. La Figure 1.21 illustre le fait que le point C fait partie de l'objet et qu'il se projette donc dans toutes les silhouettes et que les points A et B ne font pas partie de l'objet alors qu'ils se projettent pourtant dans toutes les silhouettes. Le *visual hull* est définie comme l'ensemble des points 3D de l'espace qui se projettent dans toutes les silhouettes. La modélisation du *visual hull* est faite à l'aide de voxels. Une caractéristique importante de Laurentini est que plus le nombre de caméras augmente, plus l'écart entre le volume réel de l'objet et le volume représenté par les *visual hull* diminue. Cette méthode ne permet pas de représenter directement les parties concaves. Par exemple, le point B de la Figure 1.21 ne pourra jamais être éliminé du *visual hull* en n'utilisant que des silhouettes. Les méthodes basées sur les silhouettes sont rapides et robustes mais elles sont limitées à de simples objets en raison du type d'information utilisé. Il existe des méthodes permettant d'améliorer le *visual hull* de manière à creuser les parties concaves. Le *Space Carving* par exemple se base sur l'observation de la couleur d'un voxel [KS00]. Les approches basées sur la stéréovision permettent également d'améliorer les résultats.

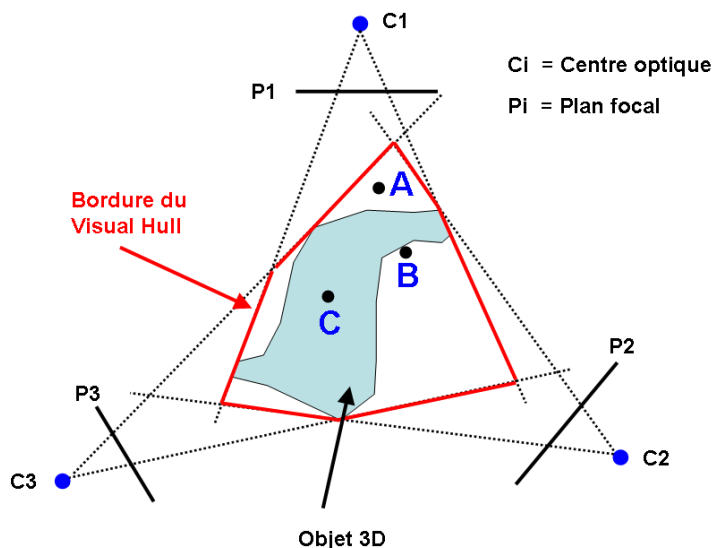


FIG. 1.21 – Exemple de reconstruction avec une approche *visual hull*.

1.5.2.3 Acquisition par analyse de l'ombrage

La classe suivante regroupe les méthodes utilisant l'ombrage *shape from shading* (SFS), introduites par Brooks et Horn [BH89]. Le SFS consiste à reconstruire le relief (*shape*) d'une scène à partir d'une seule image, grâce à l'analyse de ses ombres propres (*shading*). Son principe, illustré Figure 1.22 est basé sur une image en niveaux de gris. L'objectif est alors de trouver l'altitude en chaque point de la surface de la scène. Ce problème étant difficile à résoudre dans le cas le plus général, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sur la scène, sur la source de lumière et sur l'appareil photographique sont souvent faites, mais chacune de ces hypothèses nous éloigne de l'objectif qui est de pouvoir reconstruire la scène en trois dimensions. L'importance des contraintes requises pour ce type de méthodes les rend inutilisables dans des conditions réalistes. Des travaux récents sur ces algorithmes, en particulier le cas de caméras projectives, ont ouvert de nouvelles possibilités pour des applications pratiques comme la reconstruction de visages [PF03] ou encore la simulation de la mise à plat de documents bombés [CCDG04].

1.5.2.4 Autres méthodes d'acquisition

Il existe d'autres méthodes utilisant l'information de couleur de la scène. Une première façon consiste à mesurer la cohérence des couleurs à la création d'un voxel du volume [SD99, MFK99]. Le problème est que ces méthodes ne peuvent fournir qu'un modèle composé d'un ensemble de voxels, ce qui rend difficile l'obtention d'une bonne représentation du maillage 3D.

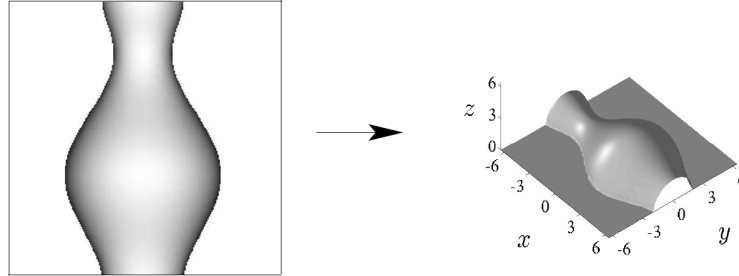


FIG. 1.22 – Exemple de reconstruction de formes à partir de l’ombrage *shape from shadow*.

1.5.3 Méthodes hybrides

Il existe des méthodes spécifiques qui tentent d’utiliser, en même temps, plusieurs types d’information, comme les silhouettes [LBK91, IS03] ou l’ombrage [FL95, JYS00]. Bien que ces méthodes donnent de très bons résultats, la qualité est encore limitée, les deux principaux problèmes étant l’extraction des données 3D à partir des images et la fusion des différentes données.

Conclusion

L’imagerie 3D est un domaine récent, l’utilisation d’objets 3D commence en 1980 avec l’arrivée des ordinateurs personnels. Depuis, l’imagerie 3D n’a cessée de prendre de l’ampleur avec l’augmentation de la puissance des ordinateurs et des débits des lignes internet qui permettent le transfert rapide de fichier de grande taille. Nous avons présenté dans ce chapitre plusieurs domaines autour de l’imagerie 3D, tous ces domaines sont des sujets ouverts et évoluent constamment. Même si le rendu à l’aide de maillage est très largement utilisé, un grand nombre de travaux, notamment autour de la compression, portent sur les différentes modélisations. Les métriques utilisées pour calculer les distorsions entre deux maillages dans le cas d’insertion de données mais aussi pour optimiser les méthodes de compression sont aussi un sujet de recherche en évolution. A noter qu’il n’existe pas encore de norme pour le calcul de la distorsion entre deux objets 3D. Les méthodes d’acquisition elles aussi évoluent et cherchent toujours à être de plus en plus précises. Elles sont aidées par l’évolution de la technologie dans ce domaine, comme l’augmentation de la taille et de la précision des capteurs.

Chapitre 2

Dissimulation d'information

Introduction

Les plus anciens exemples d'écriture secrète sont rapportés par Hérodote au V^e siècle avant J-C. Le message était gravé sur une tablette de bois puis recouvert par de la cire. Les tablettes, apparemment vierges, ne soulevèrent aucune réaction chez les gardes tout au long du trajet. Une fois la tablette arrivée à son destinataire il lui suffisait d'enlever la cire pour lire le message. Une autre manière de faire passer des messages consistait à raser la tête des esclaves pour y inscrire un message puis attendre que les cheveux repoussent pour envoyer le messenger. A l'arrivée, il suffisait de raser à nouveau le crâne de l'esclave pour en lire le message. Le mode de communication secrète obtenu en dissimulant l'existence du message est appelé la stéganographie, mot élaboré à partir des mots grecs *steganos*, voulant dire couvert, et *graphien*, écriture. De Hérodote à aujourd'hui des formes diverses de stéganographie ont été utilisées dans le monde entier. La longévité de la stéganographie prouve qu'elle offre un minimum de sécurité, mais elle souffre d'une faiblesse fondamentale : si le message est découvert, le contenu de la communication secrète est immédiatement révélé. C'est pourquoi, parallèlement à la stéganographie, se développa la cryptographie, du grec *Kryptos*, signifiant caché. Le but de la cryptographie n'est pas de dissimuler la présence du message, mais d'en cacher le contenu, procédé que l'on nomme cryptage. Afin de le rendre incompréhensible, le message est brouillé suivant un protocole mis au point préalablement par l'expéditeur et le destinataire. Ce dernier n'aura plus qu'à inverser le procédé pour rendre le message lisible. Si le message est intercepté par une tout autre personne il lui sera difficile, voir impossible, de rétablir le texte original. Un exemple de cryptographie très largement utilisé pendant la seconde guerre mondiale est la machine Enigma.

Aujourd'hui avec l'évolution de l'informatique, la dissimulation d'information est surtout utilisée pour les supports numériques (sons, images, vidéos, objets 3D). Dans cette partie nous présentons la dissimulation d'information de manière générale. Tout d'abord nous donnons un aperçu des différentes techniques de dissimulation d'information existantes en section 2.1. Ces techniques de dissimulation demandent différentes propriétés selon leurs domaines d'application et leurs finalités. Nous présentons ces

propriétés ainsi que les contraintes qui en résultent. Les différents protocoles liés aux méthodes d’insertion ou d’extraction utilisées ainsi que des exemples de dissimulation d’information appliqués aux images sont présentés en section 2.2. Nous décrirons ensuite différentes méthodes de dissimulation d’information appliquées aux objets 3D en section 2.3.

2.1 Différentes approches de dissimulation d’information

Dans cette partie nous présentons différentes approches de dissimulation d’information. Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes familles que sont l’écriture brouillée et l’écriture invisible. La Figure 2.1 illustre cette classification. La cryptographie qui découle de l’écriture brouillée est présentée dans la section 2.1.1. Pour l’écriture secrète nous présentons la stéganographie dans la section 2.1.2, puis le tatouage section 2.1.3.

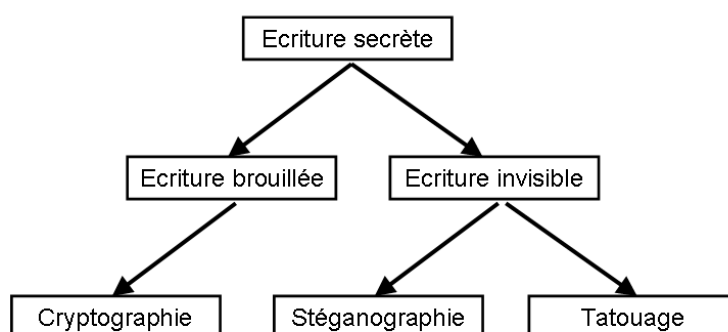


FIG. 2.1 – Classification des différentes techniques d’écriture secrète.

2.1.1 Cryptographie

La cryptographie est un terme générique désignant l’ensemble des techniques permettant de chiffrer des messages, les méthodes de dissimulation sont basées sur des concepts mathématiques, les données ne sont pas dissimulées mais indéchiffrables sans une action spécifique [Sch95, Sti95]. Les algorithmes de cryptage peuvent être séparés en fonction de plusieurs caractéristiques ; selon le type de clefs : les systèmes à clef publique-privé (systèmes asymétriques) et ceux à clef secrète (système symétriques) ; selon les techniques de chiffrement : par bloc ou par flot ; ou selon les corrélations entre le flux de clefs (*keystream*) et les textes clairs et chiffrés : synchrone ou asynchrone. Les systèmes à clef secrète sont ceux qui permettent de crypter et décrypter avec la même clef [CC98]. L’émetteur et le récepteur doivent s’être auparavant partagé le secret de la clef par un moyen de communication sécurisé. Les systèmes à clef publique ou asymétrique permettent de pallier à cette inconvénient en utilisant une clef pour crypter, et

une autre clef pour décrypter. Le chiffrement par flot ou par flux traite les caractères comme une suite de bits, un à la fois. Le chiffrement par bloc coupe le texte en blocs de tailles fixes puis crypte séparément chaque bloc.

2.1.2 Stéganographie et insertion de données cachées

La stéganographie est une méthode d'insertion de données cachées qui se veut statistiquement indécélable [JJ98]. La stéganographie peut servir pour de la communication secrète par exemple ou pour de l'enrichissement de contenu. Dans le cas de l'enrichissement de contenu d'un média il est alors question d'insertion de données cachées ou *Data Hiding*, le but est d'insérer dans le média une quantité importante de données. L'information ajoutée permettra aux utilisateurs possédant le décodeur approprié d'exploiter des fonctionnalités supplémentaires. La stéganographie est utilisée pour la plupart des médias (texte, son, image, vidéo, objet 3D). La principale contrainte de ces méthodes est l'imperceptibilité visuelle et statistique tout en cherchant à maximiser la capacité du canal caché.

2.1.3 Tatouage

Le tatouage est aussi un principe de dissimulation d'information mais à la différence de la stéganographie il offre des solutions techniques pour faire face aux problèmes de protection des droits et de copie. Les méthodes de tatouage ou *watermarking* peuvent se classer en deux catégories, le tatouage fragile et le tatouage robuste. Ces catégories sont liées à l'application que l'on veut faire du tatouage.

2.1.3.1 Tatouage fragile

Le tatouage fragile a pour but de disparaître à la moindre modification du média. Cette propriété est utilisée afin de garantir l'authenticité ou l'intégrité d'un média [WLDB08]. En effet, il est possible de vérifier l'authenticité en fonction de la présence ou non de l'information cachée. Pour garantir l'intégrité d'un média avec une approche de tatouage fragile, le message caché de manière fragile sera constitué d'informations sur le média lui-même (signature). Il est ainsi possible de détecter l'endroit et la nature des changements effectués sur le média.

2.1.3.2 Tatouage robuste

A l'inverse du tatouage fragile, le tatouage robuste doit résister à de nombreuses modifications du média [RAMC07]. L'insertion doit être robuste au point que la marque disparaisse qu'en cas d'une forte modification du média qui ferait de l'objet modifié un nouvel objet. Le tatouage robuste est utilisé dans les cas de protection de droits d'auteurs (ou copyright). Pour ce type de tatouage des marques de petites taille comme un logo ou une signature sont utilisées. La marque peut être répétée ou codée avec des codes correcteurs d'erreur afin d'accroître la robustesse de l'algorithme.

2.2 Évaluation et protocoles des algorithmes de tatouage

Les algorithmes d'insertion de données sont évalués selon différentes contraintes. Nous présentons dans la section 2.2.1 les trois principales contraintes ainsi que deux contraintes supplémentaires qui nous semblent toutes aussi importantes pour évaluer les algorithmes de tatouage. Les algorithmes de tatouage se différencient par leurs méthodes d'insertion, d'extraction ou encore par le type de données qu'ils contiennent. Nous décrivons dans la section 2.2.2 les différents protocoles utilisés, ces protocoles sont valables pour plusieurs domaines d'application (son, image, vidéo, objet 3D). Nous présenterons ensuite section 2.2.3 différentes méthodes de tatouage appliquées aux images.

2.2.1 Evaluation

Les contraintes les plus standards, relativement antagonistes, sont les contraintes de perceptibilité, de robustesse et de capacité, comme illustré Figure 2.2. Une augmentation par exemple de la contrainte de capacité entraîne une diminution des contraintes de perceptibilité et de robustesse. Dans cette section nous présentons section 2.2.1.1 la contrainte de capacité, section 2.2.1.2 la contrainte de perceptibilité et section 2.2.1.3 la contrainte de robustesse. Dans de nombreuses applications d'autres contraintes importantes sont également à prendre en compte, la contrainte de sécurité présentée dans la section 2.2.1.4 ou encore la contrainte de complexité en temps de calcul présentée dans la section 2.2.1.5.

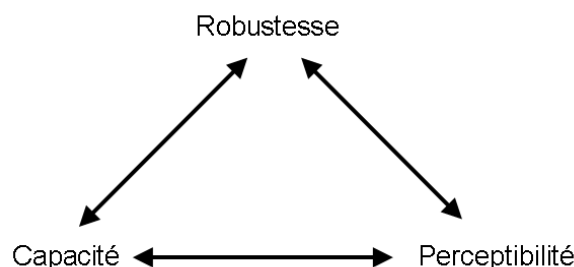


FIG. 2.2 – Compromis entre robustesse, invisibilité et capacité.

2.2.1.1 Capacité

La capacité d'insertion ou *payload* d'un système de tatouage est la quantité d'information, mesurée en bits, que l'on peut tatouer. Cette quantité d'information indique le nombre de combinaisons possible de messages que le système est capable de contenir. Si la méthode de tatouage permet d'insérer N bits, le nombre de messages différent possible est de 2^N . La capacité d'insertion d'une méthode ne dépend pas uniquement de l'algorithme mais aussi des caractéristiques du support utilisé et de l'application visée. La mesure de la capacité est faite entre le volume d'information du tatouage et

le volume d'information du support utilisé. Pour une image par exemple la capacité s'exprime en bit/pixel, pour un objet 3D elle s'exprime en bit/sommet.

2.2.1.2 Perceptibilité

La principale exigence d'un algorithme de tatouage est la préservation du support. L'insertion de la marque doit être imperceptible même en comparant le support original et le support tatoué. Il existe différents tests psycho-visuels pour évaluer la distorsion introduite par le tatouage. Il existe aussi des techniques plus adaptées au type de support utilisé comme le rapport signal sur bruit (PSNR) pour les images ou la distance de Hausdorff pour les objets 3D. Pour avoir un aperçu des méthodes de mesure de distorsion pour les objets 3D vous pouvez vous référer à la section *Métriques 3D* 1.4 de la première partie de ce document.

2.2.1.3 Robustesse

La robustesse est la capacité du système à résister aux manipulations ou attaques. La robustesse d'une méthode est aussi liée à l'application que l'on veut en faire, un algorithme fait pour le copyright demandera plus de robustesse qu'un algorithme de stéganographie par exemple. Deux sortes d'attaques peuvent être distinguées, les attaques bienveillantes et malveillantes. Les attaques bienveillantes sont les attaques autorisées par le support comme les transformations affines, la compression ou encore le changement de format. Les attaques malveillantes sont celles opérées par des utilisateurs essayant de retirer ou d'effacer la marque. La section 1.3 illustre les différentes manipulations possibles des objets 3D.

2.2.1.4 Sécurité

La sécurité est une contrainte importante pour un algorithme de tatouage. Si nous intégrons le principe de Kerckhoffs [Ker83], il faut alors supposer que le pirate dispose du code source de l'algorithme de tatouage qu'il tente d'attaquer. Dans ce cas, le seul point qui assure la sécurité du message est la clef qui a permis son insertion. La sécurité d'un algorithme de tatouage permet d'assurer qu'en cas de récupération du message, celui ci ne sera pas exploitable sans la connaissance de la clef.

2.2.1.5 Complexité

La complexité d'un algorithme est la mesure du nombre d'opérations fondamentales qu'il effectue sur un jeu de données. Cela permet d'évaluer le temps d'exécution d'un programme. La complexité est exprimée comme une fonction de la taille du jeu de données. L'échelle de comparaison définit les grandes classes de complexité :

- Les algorithmes *sub-linéaires* : $O(\log n)$, sont les plus rapides.
- Les algorithmes *linéaires* : les algorithmes en $O(n)$ et ceux en $O(n \log n)$ sont considérés comme rapides.
- Les algorithmes *polynomiaux* : en $O(n^k)$ sont considérés comme lents pour $k > 2$.

- Les algorithmes *exponentiels* : sont considérés comme impraticables dès que la taille des données est supérieure à quelques dizaines d’unités.

La complexité est une contrainte importante dans l’industrie. Pour qu’un algorithme de tatouage soit utilisable dans l’industrie il faut que l’opération d’insertion soit rapide, c’est aussi le cas pour une utilisation en ligne ou en temps réel par exemple.

2.2.2 Protocoles de tatouage

Nous présentons dans cette section différents protocoles de tatouage. Ces protocoles sont généraux et sont utilisés autant en 2 dimensions pour les images qu’en 3 dimensions. Ils sont parfois utilisés pour classifier les méthodes de tatouage.

2.2.2.1 Tatouage zéro-bit/multiple-bits

Les premières techniques de tatouage ont été séparées en deux catégories respectant l’information transmise par le message. La première de ces catégories *Zéro bit* vérifie uniquement la présence ou non de l’information cachée correspondant à une signature connue par le récepteur. Dans la seconde catégorie *Multiple bits* nous cherchons non seulement à savoir si le modèle a été tatoué ou non, mais aussi à en extraire le message caché.

2.2.2.2 Insertion aveugle/informée

Au début des années 1990 les modèles de tatouage sont représentés comme un canal de communication et toute distorsion entre l’insertion et l’extraction est traitée comme du bruit. Dans ces premiers systèmes de tatouage, dit *aveugle*, le message inséré est indépendant du document support. La Figure 2.3 illustre le schéma général du tatouage aveugle. Un exemple d’insertion aveugle est la méthode d’insertion par étalement de spectre [CKLS97] ; un vecteur pseudo aléatoire est généré à l’aide d’une clef, puis multiplié par -1 ou 1 en fonction du bit du message à insérer et ajouté au signal original. Pour l’extraction du message le signal pseudo aléatoire est généré à l’aide de la même clef puis corrélé avec le signal tatoué. En 1998, le schéma de Costa [Cos83] sur la transmission est redécouvert, transposé au tatouage et les premières solutions de tatouage informé ont alors été proposées. Les travaux de Costa montrent que l’on peut tirer parti de la connaissance *a priori* de la réalisation du signal que l’on souhaite tatouer lors de la phase d’insertion. Le message inséré est fonction du document support, il est question alors de tatouage informé. La Figure 2.4 illustre le schéma général du tatouage informé. Il faut bien faire la distinction entre le codage informé où il est question de coder le message et l’insertion informée qui est l’insertion du message dans le signal hôte. Pour effectuer un tatouage informé sur un objet 3D il est possible par exemple de calculer les vecteurs entre chaque sommet du nuage de points et le centre de masse de l’objet. Ces vecteurs peuvent alors être modulés en distance comme illustré Figure 2.5 afin de tatouer un bit du message.

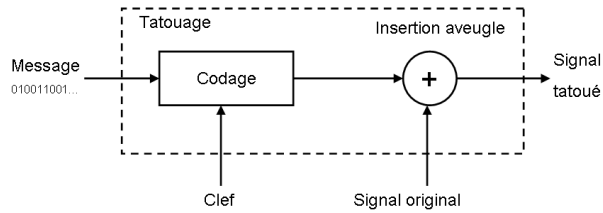


FIG. 2.3 – Schéma général du tatouage aveugle.

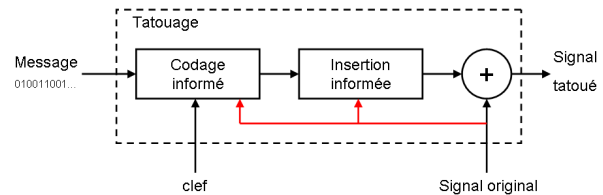


FIG. 2.4 – Schéma général du tatouage informé.

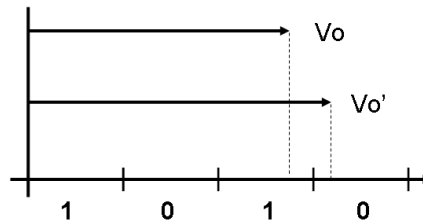


FIG. 2.5 – Exemple d'insertion informée où V_o représente la données originale et V_o' la donnée modifiée après l'insertion d'un 0.

2.2.2.3 Extraction aveugle/non aveugle

Ces deux méthodes se distinguent par le besoin ou non de l'objet original pour l'extraction. En effet les méthodes non aveugles ont besoin de l'objet original afin d'extraire l'information cachée. Le fait d'avoir besoin du modèle tatoué et du modèle original afin d'extraire le message limite l'utilisation de cette méthode. A l'inverse, les méthodes aveugles n'ont pas besoin de l'objet original pour l'extraction. Ces méthodes sont plus difficiles à mettre en œuvre mais apportent un intérêt majeur pour le tatouage en général. La plupart des méthodes développées actuellement sont aveugles.

2.2.2.4 Tatouage réversible/non-réversible

Le tatouage réversible, ou sans perte, permet de récupérer toute l'information originale du média après extraction de la marque. Le tatouage non-réversible, ou avec pertes, altère définitivement le média lors du mécanisme d'insertion de la marque. La plupart des méthodes sont généralement non-réversibles. Dans le cas du tatouage réversible, le challenge actuel est d'avoir un support marqué (avant l'extraction réversible) de très bonne qualité avec une grande capacité.

2.2.2.5 Tatouage visible/invisible

Le tatouage visible est sujet à controverse. Il y a une branche de chercheurs qui disent que si la marque est visible, alors elle peut être facilement attaquée. Néanmoins, plusieurs applications demandent que la marque soit visible, c'est le cas du logo des sociétés de programme télévisuel. Le tatouage invisible est l'approche la plus développée, la majorité des techniques concernant la protection intellectuelle suit la branche du tatouage invisible. Le tatouage visible d'une vidéo reste désagréable pour l'utilisateur.

2.2.2.6 Tatouage additif/substitutif

Dans le cas du tatouage additif, le message à cacher est transformé en un signal qui est ensuite ajouté de manière additive au média. C'est le cas des méthodes d'étalement de spectre où le message est modulé avec une porteuse puis additionné au média. Le tatouage substitutif consiste à isoler une caractéristique du média et à la forcer à l'état désiré pour chaque bit à cacher. Les méthodes les plus simples sont celles utilisant la substitution des bits de poids faible (LSB) où le bit de poids faible est remplacé par le bit du message.

2.2.3 Tatouage d'images

Dans cette section nous donnons un aperçu de méthodes de dissimulation de données appliquées aux images. Plusieurs approches sont possibles pour classer les techniques de tatouage d'image. Celles-ci peuvent être fonction des différents protocoles de tatouage présentés section 2.2.2 ou encore de la technique de dissimulation utilisée. Nous choisissons ici de les classer selon l'espace d'insertion utilisé, spatial ou transformé.

2.2.3.1 Domaine spatial

Une des techniques les plus simples pour l'insertion de données cachées dans le domaine spatial est la modification du bit de poids faible LSB (Least Significant Bit). Le message est inséré dans l'image par remplacement du LSB du pixel par le bit du message. Une autre méthode appelée quantification vectorielle consiste à remplacer des vecteurs de l'image (blocs de pixels) par des vecteurs appartenant à un dictionnaire prédéfini. Il existe des méthodes d'ajout d'une séquence aléatoire 2D comme la technique d'étalement de spectre de Hartung et Girod [HG98] et la technique du patchwork de Bender *et al.* [BGML96].

2.2.3.2 Domaine transformé

Les méthodes présentées dans cette section insèrent le message dans des espaces transformés comme la DCT (Discrete Cosinus Transform), la DFT (Discrete Fourier Transform) ou la DWT (Discrete Wavelet Transform) par exemple. Cette approche d'insertion rend le message plus robuste à certaines attaques comme la compression du fait que l'information est dissimulée dans les parties les plus significatives du signal. La DCT appliquée aux images est très utilisée depuis la création de la norme JPEG. Un grand nombre de méthodes d'insertion de données cachées ont été développées à partir de la DCT. Avec l'arrivée de la norme JPEG2000, la DWT a pris beaucoup d'ampleur et de nombreuses méthodes utilisant la DWT ont fait leur apparition.

2.3 Tatouage d'objets 3D

Avec l'évolution des réseaux informatiques, le téléchargement d'objets 3D devient une transmission courante. Afin d'être universellement lisibles ces objets 3D doivent répondre à des normes et des standards internationaux. Même si nous souhaitons apporter de nouvelles fonctionnalités à ces objets, il est donc important de respecter les formats standards¹ permettant de manipuler ces objets 3D. La représentation la plus utilisée pour les objets 3D est le maillage surfacique. Cette représentation, composée de sommets, d'arêtes et de faces, est très répandue car supportée par toutes les cartes de rendu graphique. De nombreuses méthodes d'insertion de données sont basées sur cette représentation. Nous proposons de classer les méthodes d'insertion de données cachées en trois catégories. La première de ces catégories de méthodes d'insertion repose sur l'ordonnement des primitives des objets section 2.3.1. La seconde catégorie est basée sur la modification de la connectivité ou de la topologie des objets 3D à marquer section 2.3.2. Dans ces deux premières catégories la position des points composant l'objet 3D original est inchangée. La troisième catégorie s'appuie sur des déplacements spatiaux des points de l'objet 3D ou sur la déformation géométrique d'autres primitives constituant les objets 3D, que ce soit dans le domaine spatial ou dans un domaine transformé section 2.3.3.

2.3.1 Méthodes basées sur la réorganisation du fichier de données

Cette première catégorie présente des méthodes d'insertion qui reposent sur l'organisation des données au niveau du fichier constituant l'objet 3D. Ichikawa *et al.* [ICA02] proposent deux méthodes de tatouage utilisant la modification de l'organisation des données afin d'insérer un message caché. La première méthode modifie l'ordre des triangles dans la liste de triangles, alors que la seconde méthode modifie l'ordre des triplets de points formant le triangle.

Dans cette première catégorie nous pouvons noter que les caractéristiques de l'objet 3D original restent inchangées. Par contre ces méthodes ne résistent pas à la manipula-

¹tels que STL, PLY, X3D etc ...

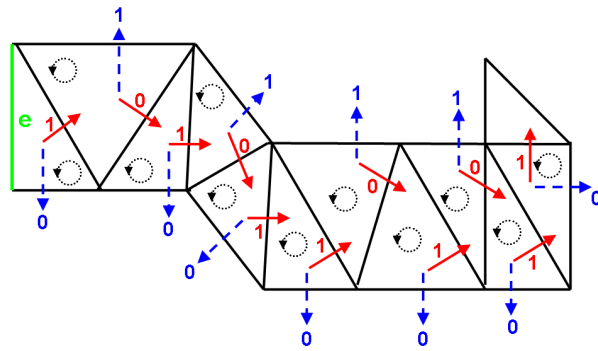
tion du fichier contenant les données initiales telle que l'inversion de deux lignes d'index de triangle par exemple.

2.3.2 Méthodes basées sur la connectivité et la topologie

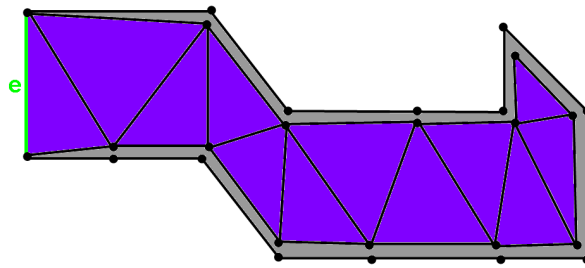
Ces méthodes d'insertion reposent sur la modification de la connectivité ou des caractéristiques topologiques des objets 3D à marquer. Ces modifications sont prises en compte en général dans le domaine spatial. L'algorithme de tatouage *Triangle Strip Peeling Symbol sequence* (TSPS) de Ohbuchi *et al.* est basé sur une modification topologique [OMA97]. Pour insérer de l'information dans le maillage cet algorithme utilise une bande de triangles qui va être déconnectée du maillage. La première étape consiste à choisir dans le maillage original l'arête de départ e de l'algorithme. En partant de l'arête de départ e et du message à insérer, une bande de triangles est construite. Le choix du triangle suivant dans la bande se fait en fonction du bit du message et du sens de parcours (horaire ou anti-horaire) des arêtes du triangle comme illustré Figure 2.6.a. Une fois que la bande de triangles sur le maillage d'origine est créée celle-ci est déconnectée du maillage en dupliquant les sommets sauf pour l'arête e qui est la condition initiale pour trouver le message. La Figure 2.6.b illustre un exemple de bande de triangles décollée du maillage original. Le maillage se retrouve donc avec un trou (la partie grise de la Figure 2.6.b) recouvert par une bande de triangles contenant le message (la partie bleue de la Figure 2.6.b). L'extraction se fait en cherchant l'arête de départ e puis en parcourant la bande de triangles pour en extraire le message. Cette méthode a pour inconvénient d'ajouter des sommets à l'objet 3D et donc d'augmenter la taille du fichier. Elle change aussi une propriété de l'objet en y ajoutant des trous.

Mao *et al.* ont développé une méthode consistant à ajouter des triangles plus petits à l'intérieur des triangles initiaux de l'objet 3D dans lequel l'information cachée est insérée [MSI01]. Avec cette approche, chacune des arêtes d'un triangle initial est divisée en deux arêtes par un sommet d'un petit triangle inséré à l'intérieur du triangle à marquer. Le choix du triangle de départ est fait à l'aide d'une clef. Les triangles suivants pour l'insertion sont choisis parmi les voisins du triangle tatoué en tournant dans un sens choisi au préalable. Un exemple de division est illustré dans la Figure 2.7. Le ratio entre les longueurs des deux arêtes a et b ainsi formées à partir du triangle d'origine est utilisé pour réaliser l'insertion d'un bit pour chacune des arêtes initiales de chaque triangle. L'extraction se fait en parcourant les triangles à partir du premier donné par la clef et en récupérant les bits insérés. Cette méthode a une forte capacité d'insertion car l'étape de division d'un triangle peut être répétée plusieurs fois. En contre partie, la taille du fichier marqué augmente fortement.

Dans cette catégorie, nous pouvons noter que la position des points composant l'objet 3D original est inchangée. Cependant, les méthodes proposent de rajouter des points supplémentaires et donc de modifier la taille du fichier de l'objet 3D. La plupart de ces méthodes ne sont pas robustes aux attaques sur la connectivité, et toutes les attaques qui modifient le maillage et dont la topologie engendre une perte du message. Nos travaux présentés dans le chapitre 2 de la seconde partie de ce document s'inscrivent dans cette catégorie.



(a)



(b)

FIG. 2.6 – a) Construction de la bande de triangle à partir du message 101011101011, b) Bande de triangle déconnectée du maillage original.

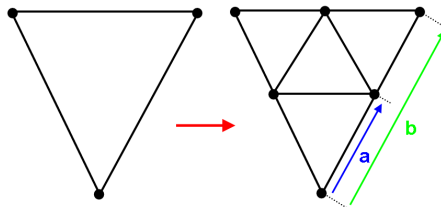


FIG. 2.7 – Division d'un triangle en quatre triangles plus petits.

2.3.3 Méthodes basées sur des modifications géométriques de l'objet 3D

Cette famille de méthodes de tatouage est basée sur la modification de la géométrie de l'objet 3D, comme par exemple la position des points ou encore les normales des triangles ou des faces. Contrairement aux familles précédentes d'insertion, qui ne s'appliquent que dans le domaine spatial, cette catégorie peut s'appliquer dans le domaine spatial ou transformé. Bien que l'insertion soit basée sur une modification de la géométrie, la synchronisation des zones d'insertion peut s'appuyer sur l'information de

topologie.

2.3.3.1 Domaine spatial

Ohbuchi *et al.* proposent différentes méthodes de tatouage dans le domaine spatial, comme le *Tetrahedral Volume Ratio* (TVR) et le *Triangle Similarity Quadruple* (TSQ) [OMA97].

Le TVR utilise le rapport des volumes de deux tétraèdres. Dans cette méthode, un tétraèdre de référence est nécessaire afin de pouvoir rapporter le volume des autres. Les tétraèdres utilisés sont formés par une arête et les deux triangles incidents. Le parcours du graphe de connexité repose sur un arbre de recouvrement des points. Les arêtes de l'arbre construit servent à générer et à référencer les tétraèdres ainsi que leur ordre de parcours.

La méthode basée sur le TSQ utilise la paire de rapports $\frac{b}{a}, \frac{h}{c}$ ou $\frac{1}{2}$ afin de définir une série de triangles similaires, où a , b et c sont les cotés d'un triangle et h la hauteur. La Figure 2.8.a illustre un exemple de triangle de base. La méthode utilise les triangles voisins ayant une arête commune pour définir la zone d'insertion, comme illustré Figure 2.8.b. Le triangle central, nommé M , sert à signaler la présence d'information cachée. L'un de ses voisins, nommé S , contient l'index du triangle utilisé pour insérer le bit du message. Les deux autres voisins restants, nommés D_1 et D_2 , servent alternativement à enregistrer l'information utile. Le triangle central M est utilisé pour définir si le triangle est marqué ou non, pour cela les coordonnées des sommets P_1, P_2 et P_4 sont modifiées afin que les paires de distances $\{P_{14}/P_{24}, h_4/P_{12}\} = \{b/a, h/c\}$ où P_{ij} représentent les arêtes entre P_i et P_j . Un index est ensuite inséré dans le triangle S en modifiant la paire $\{P_{02}/P_{01}, h_0/P_{12}\}$ à l'aide du sommet P_0 . Cet index sert à ordonner les zones d'insertion. Les deux bits du message sont insérés dans les triangles D_1 et D_2 en modifiant les paires $\{P_{13}/P_{34}, h_3/P_{14}\}$ et $\{P_{25}/P_{54}, h_5/P_{24}\}$ à l'aide des sommets P_3 et P_5 respectivement. La Figure 2.9 illustre l'insertion du mot *3d embedding* dans un maillage.

L'algorithme *Vertex Flood* de Benedens [Ben99a] repose sur la modification de la distance des sommets admissibles au centre de masse de l'objet, cet algorithme travaille uniquement sur les sommets et n'a pas besoin de la topologie de l'objet 3D. Une distance maximale, notée D_{max} supérieure à la distance maximale entre les sommets du modèle 3D et son centre de gravité est choisie. Cette distance est alors divisée en N^2 intervalles qui représentent l'espace de tatouage. Les sommets sont déplacés sur la droite passant par le centre de gravité et le sommet à tatouer afin d'amener le sommet dans l'intervalle voulu. Cette méthode a l'avantage de s'adapter à tous les types de maillage et n'a pas besoin de connaître la topologie de l'objet. Par contre une modification même locale des points qui affecterait le centre de gravité de l'objet fait perdre l'ensemble du message.

Une seconde méthode de Benedens *Triangle flood* utilise les informations de connectivité et de géométrie pour générer un parcours unique sur le maillage de l'objet [Ben99b]. Dans cette méthode l'insertion du message se fait en modifiant la position des points afin de modifier la hauteur des triangles.

La méthode proposée par Bors utilise la configuration géométrique locale des points

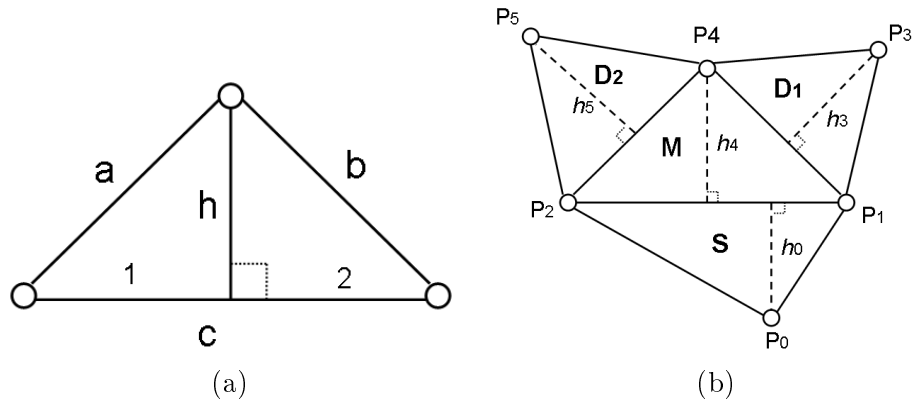


FIG. 2.8 – a) Exemple de triangle de base utilisé pour rechercher des triangles similaires, b) Exemple d’insertion sur un triangle.

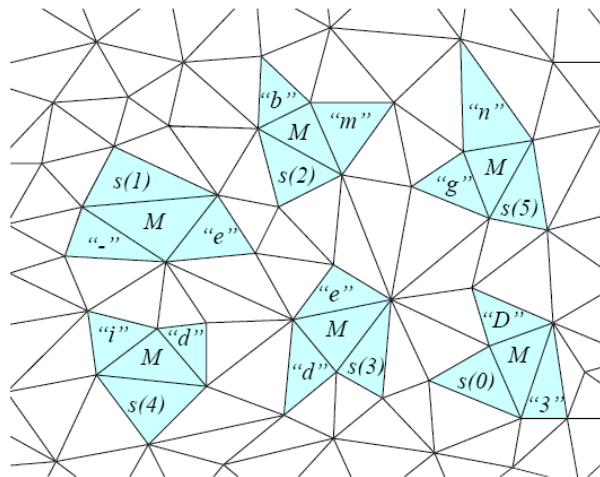


FIG. 2.9 – Exemple d’insertion du message "3d embedding" sur un maillage.

pour sélectionner des zones d’insertion [Bor06]. La zone est représentée par un sommet et tous les triangles contigus. Dans son approche Bors calcule ensuite un voisinage ellipsoïdal pour ce sommet. Pour coder une valeur à 0, le sommet est déplacé à l’extérieur de son voisinage et pour coder une valeur à 1 il est déplacé à l’intérieur. La figure 2.10.a montre un maillage avec 3 zones d’insertion, la Figure 2.10.b montre ces mêmes zones après insertion des bits 010.

Dans cette catégorie nous trouvons des méthodes utilisant le partitionnement de la surface en patchs afin de résister à des attaques comme le cropping qui reste une des plus fortes attaques en 3D. La méthode de Agarwal et Prabhakaran est une méthode aveugle, robuste et qui résiste au cropping [AP07]. Cette approche est basée sur une méthode de clustering qui permet d’ordonner les sommets. L’algorithme divise les sommets en

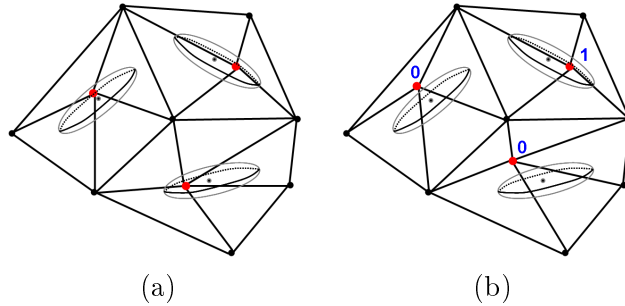


FIG. 2.10 – a) Maillage original avant insertion, b) Maillage avec insertion du message 010.

patches (clusters) en utilisant une approche sur la recherche des plus proches voisins heuristiques. A l'intérieur de chaque cluster les sommets sont ordonnés à l'aide d'un graphe. Les sommets ayant au moins deux connexions sont appelés *cluster heads* et les autres sont utilisés pour l'insertion. Les Figures 2.11.a et 2.11.b illustrent un exemple de partitionnement en cluster et inter cluster avec une représentation des sommets appelée *cluster head*. Le vecteur entre le cluster à tatouer et le cluster head est divisé en intervalles. L'insertion est faite en modifiant la distance entre le cluster à tatouer et le cluster head pour l'amener dans l'intervalle voulu tout en diminuant la distance euclidienne. Le fait de diminuer la distance euclidienne permet de préserver la contrainte qui leur a permis de séparer les clusters entre eux, comme illustré Figures 2.12.a et 2.12.b. Le message est inséré de manière redondante dans chaque patch de façon à être robuste à la désynchronisation en cas de perte d'un des patch.

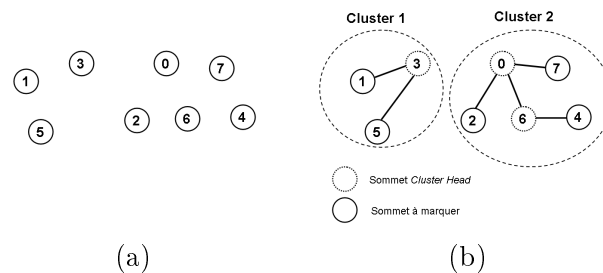


FIG. 2.11 – a) Nuage de points original, b) Nuage de points partitionné en clusters, chaque cluster est organisé en graphe avec une représentation des sommets cluster head et des sommets à tatouer.

Dans la méthode de Cayre et Macq, la sélection des zones d'insertion est faite par un parcours unique du maillage à l'aide d'une clef secrète [CM03]. La base des triangles choisis pour l'insertion est divisée en intervalles. L'insertion est faite en projetant le sommet d'un triangle sur sa base et en regardant à quel intervalle il appartient. Le nombre d'intervalles est choisi en fonction de la distorsion et de la robustesse que l'on

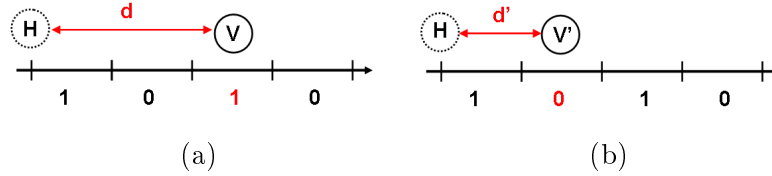


FIG. 2.12 – a) Sommet avant insertion, b) Sommet après insertion d'un 0.

souhaite introduire. Plus les intervalles sont petits moins la distorsion est grande, au contraire plus les intervalles sont grands plus l'insertion sera robuste. Les Figures 2.13.a et 2.13.b illustrent deux exemples d'insertion avec deux intervalles différents.

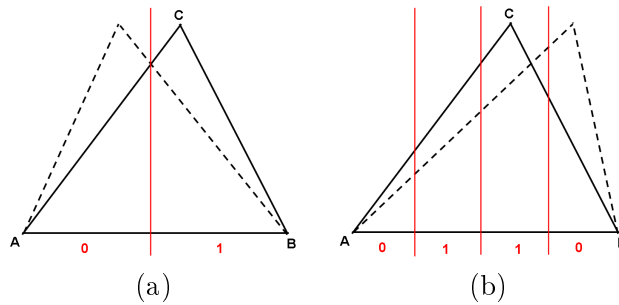


FIG. 2.13 – a) Partition de la base AB en 2 segments, b) Partition de la base AB en 4 segments.

La méthode de Wagner [Wag00] vise à insérer les données cachées dans les longueurs relatives des vecteurs laplaciens locaux. Pour cela, Wagner modifie la courbure locale de l'objet. L'utilisation des NURBS a également été explorée pour tatouer des objets 3D. Benedens a proposé une méthode de tatouage d'objet 3D en utilisant des NURBS et en modifiant les poids et les vecteurs des noeuds de manière à préserver la géométrie globale [Ben00]. Lee *et al.* proposent dans leur méthode d'insérer la marque non plus directement dans l'objet 3D, mais dans des images virtuelles dérivées de celui-ci [LCK02]. Dans leur article, pour effectuer le tatouage, trois images virtuelles sont construites en échantillonnant uniformément l'objet 3D et en enregistrant les coordonnées des points ainsi obtenus.

2.3.3.2 Domaine transformé

La première approche appliquée dans un domaine transformé a été proposée par Kanai *et al.* [KDK98]. Dans leur méthode ils utilisent une décomposition en ondelettes du maillage et insèrent l'information en modifiant le bit de poids faible de certains coefficients d'ondelettes. La décomposition en ondelettes est illustrée Figure 2.14. Il existe de nombreux algorithmes de tatouage basés sur la décomposition en ondelettes. Yin *et al.* proposent également un algorithme qui travaille dans le domaine des on-

delettes [YPSZ01]. L'algorithme est basé sur une décomposition multirésolution du maillage de l'objet 3D développé par Guskov *et al.* [GSS99]. Wang *et al.* proposent une méthode de tatouage hiérarchique. Grâce à une décomposition en ondelettes, un tatouage robuste aux attaques géométriques et un tatouage de haute capacité sont appliqués dans différents niveaux de résolution du maillage en modifiant les normes des coefficients d'ondelettes [WLDB07].

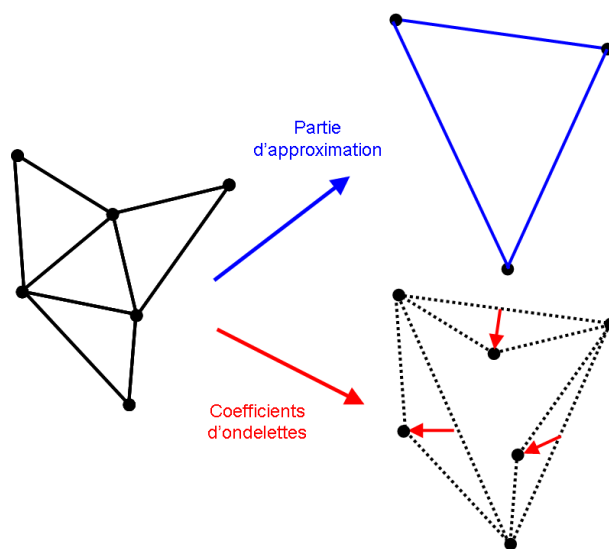


FIG. 2.14 – Exemple de décomposition en ondelettes d'une partie d'un maillage.

Dans le domaine transformé Ohbuchi *et al.* proposent une méthode qui utilise une matrice laplacienne du maillage de l'objet 3D afin de passer du domaine spatial au domaine fréquentiel [OMT02].

La méthode proposée par Praun *et al.* utilise l'espace de Kernel pour insérer l'information dans les composantes basses fréquences de la surface [PHF99]. Rondaio Alface, Macq et Cayre utilisent et améliorent la robustesse des très bonnes propriétés des méthodes de tatouage basées sur les histogrammes et les étendent à la robustesse contre le découpage (cropping) [RAMC07]. Lavoué *et al.* proposent une méthode de tatouage robuste et non-aveugle basée sur les surfaces de subdivision [LDD07]. Leur algorithme travaille dans le domaine des fréquences en modulant les coefficients spectraux du maillage de contrôle de la subdivision.

2.3.4 Autres méthodes

Bennour et Dugelay ont proposé deux méthodes de tatouage, l'une aveugle et l'autre non-aveugle, avec pour objectif de tatouer un objet 3D tel que le tatouage soit toujours présent, sous une forme ou sous une autre, dans les images 2D résultantes [BD06]. Pour la méthode aveugle, le principe est d'extraire et de discrétiser les silhouettes du modèle puis de tatouer ses contours. Pour vérifier la présence du tatouage sur l'objet il

faut extraire le contour de la meilleure vue (la plus similaire) parmi les vues utilisées pendant le processus d'insertion et la discrétiser afin d'en extraire la marque. Pour la méthode non aveugle le principe est de faire une projection parallèle sur le plan z afin d'en extraire la silhouette, seulement les coordonnées x et y seront utilisées pour l'insertion de la marque. Une technique d'étalement de spectre est ensuite utilisée sur tous les sommets de la silhouette. Pour l'extraction, une estimation de la marque est faite en calculant la différence entre les coordonnées du modèle d'origine et les coordonnées du modèle tatoué. La dernière étape consiste à calculer les coefficients de corrélation entre la marque originale et la marque estimée.

Conclusion

Le tatouage 3D est un domaine récent, la première méthode de Ohbuchi *et al.* date de 1997. Depuis la communauté autour du tatouage d'objet 3D n'a cessé d'augmenter même si elle reste bien inférieure à celle du tatouage d'image ou de vidéo. Nous avons montré dans ce chapitre que certaines approches de tatouage 3D proviennent de techniques développées pour d'autres médias, principalement l'image et la vidéo. Même si ces techniques sont proches, l'application à l'objet 3D diffère de celle de l'image. L'objet 3D à différentes représentations et son parcours n'est pas assimilable à une matrice régulière comme pour l'image. L'état de l'art que nous avons présenté s'articule principalement autour du maillage 3D triangulé. Celui-ci illustre la diversité des méthodes existantes mais plusieurs problématiques restent non résolues. Le challenge actuel est d'avoir une méthode de tatouage réversible, avec une grande capacité d'insertion et dont l'objet marqué est de très bonne qualité. Il est aussi pour l'instant impossible de prévoir si une technique de tatouage pourra résister à toutes les attaques possibles sur les objets 3D. La plupart des techniques se contentent souvent de résister à des attaques bien spécifiques. En travaillant sur une application bien précise (droits d'auteurs, authentification, intégrité, etc...) et dans un espace spécifique (nuage de points, maillage 3D, etc...), les méthodes de tatouage restent un outil fiable.

Deuxième partie

Contributions

Introduction deuxième partie

Dans cette partie nous présentons nos contributions à la digitalisation d'objet 3D et à l'insertion de données cachées dans des objets 3D. Notre contribution à la réalisation d'un digitaliseur 3D est présentée dans le chapitre 1. Nos contributions sur l'insertion de données cachées dans des objets 3D sont présentées chapitre 2.

Chapitre 1

Digitalisation d'objets 3D

Introduction

Actuellement, au niveau des industriels de la chaussure, différents systèmes de digitalisation sont disponibles. Les systèmes de digitalisation issus des industries automobiles et aérospatiales (GOM¹, Minolta², Cyberware³, etc.), et ceux spécifiquement destinés aux formiers (NewLast⁴, Palser⁵). La société STRATEGIES a déjà participé à la réalisation, la mise au point et la commercialisation d'un digitaliseur *Digilast* utilisant les techniques de vision laser. Ces digitaliseurs permettent de numériser une forme interne 3D d'une chaussure afin d'obtenir un nuage de points et sont particulièrement destinés aux formiers. La société souhaite proposer une nouvelle offre de digitalisation destinée aux fabricants de chaussures et non plus aux formiers exclusivement. Un autre enjeu pour la société STRATEGIES est l'acquisition des lignes de style. Les stylistes étant très réticents à l'utilisation de logiciels de dessin 3D sur forme, l'acquisition automatique par le digitaliseur de leur dessin manuel 3D de lignes de style devient nécessaire. Ce chapitre est composé de trois parties, nous présentons tout d'abord section 1.1 nos contributions à la réalisation d'un digitaliseur 3D. Nous présentons en section 1.2 les résultats obtenus avec la méthode développée. En section 1.3, nous introduisons une méthode permettant d'améliorer la précision de l'objet reconstruit en utilisant la théorie des possibilités. Enfin, nous concluons et donnons des perspectives afin d'améliorer le système de digitalisation présenté dans ce chapitre.

1.1 Contributions à la digitalisation d'objet 3D

Dans cette section nous détaillons le choix de l'algorithme afin de réaliser la digitalisation de formes intérieures de chaussures. En section 1.1.1 nous présentons l'attente de

¹<http://www.gom.com/EN/3d.coordinate.measurement/3d.scanning.html>

²<http://www.minolta3d.com/>

³<http://www.cyberware.com/>

⁴<http://www.newlast.com/>

⁵<http://www.palser.it/cad.html>

l'entreprise pour ce digitaliseur et les restrictions techniques qui nous ont guidé dans le choix d'une méthode plutôt qu'une autre. Nous détaillons section 1.1.2 de manière générale la méthode de digitalisation choisie. En section 1.1.3 nous présentons le système de calibrage de la caméra. Ensuite, section 1.1.4 nous présentons la méthode d'acquisition des images de l'objet sous différents angles et l'étape d'extraction des silhouettes. L'étape suivante de reconstruction, présentée section 1.1.5, consiste à transformer le volume de voxel en une surface triangulée en utilisant dans un premier temps une méthode de décimation de voxels puis la méthode des *Marching cubes*. Afin d'améliorer le rendu visuel de l'objet 3D, nous présentons en section 1.1.6 la méthode utilisée pour récupérer la couleur ou la texture de l'objet digitalisé.

1.1.1 Choix de la méthode de digitalisation

Le choix de la méthode de digitalisation a été fait en fonction de plusieurs critères. Ces premiers critères ont été donnés par l'entreprise par l'intermédiaire d'un cahier des charges. Un des premiers critères concerne la précision des données qui est de l'ordre de 0.05 mm pour chaque point élémentaire. Pour une forme de chaussure variant entre 200 mm et 550 mm , le nombre de coupes doit rester proche de 300. Le nombre de points par coupe est compris entre 200 et 400. Ceci représente donc un objet 3D constitué de 100.000 points. Le second critère est le temps de digitalisation. Afin d'être réellement utilisable dans l'industrie, le système doit pouvoir faire une acquisition et le traitement en moins de 15 minutes. De plus, le système doit être semi-automatique afin d'alléger l'apprentissage de ce nouveau système. D'autres critères interviennent également dans le choix de la méthode, ces critères sont directement liés à l'objet 3D à digitaliser. Comme nous pouvons le voir Figure 1.1, les formes intérieures de chaussures sont lisses, sans texture et d'une seule couleur qui varie selon la matière utilisée pour construire la forme. La matière constituant ces formes peut être du bois ou de la résine de différentes couleurs. Cette absence de texture sur la forme rend très difficile l'utilisation des méthodes basées sur la stéréovision. Il aurait été possible d'utiliser ces méthodes en peignant la forme de façon à créer une texture utilisable pour la stéréovision ou en projetant une texture via un laser ou un rétroprojecteur mais la forme ne peut être modifiée donc peinte. De plus l'entreprise ne souhaite pas utiliser de laser ou de vidéo projecteur. Les méthodes basées sur la stéréovision, sur les lumières structurées ou sur les lasers sont de ce fait mises de côté. Les seules méthodes utilisables sont les méthodes passives à l'exception de la stéréovision, les méthodes basées sur les silhouettes et les méthodes basées sur les ombres. Les méthodes basées sur les ombres comportent des contraintes importantes sur l'éclairage et sur la représentation de la scène (voir section 1.5.2). Un autre facteur important est l'acquisition des lignes de style, pour cela nous avons besoin de la couleur ou de la texture de l'objet 3D. En tenant compte de toutes ces contraintes au niveau de l'entreprise et de la forme, notre choix s'est naturellement porté sur les méthodes utilisant les silhouettes.



FIG. 1.1 – Différentes formes intérieure de chaussures.

1.1.2 Présentation de la méthode

Le capteur choisi pour l'acquisition des photos est un appareil photo numérique. L'objet 3D à digitaliser est placé sur un plateau avec un axe tournant, l'angle de rotation est commandé à l'aide du moteur. De cette façon il est possible d'acquérir plusieurs images d'un objet 3D sous plusieurs angles connus sans bouger l'appareil photo de place. La Figure 1.2 illustre le système d'acquisition des photographies de l'objet 3D.

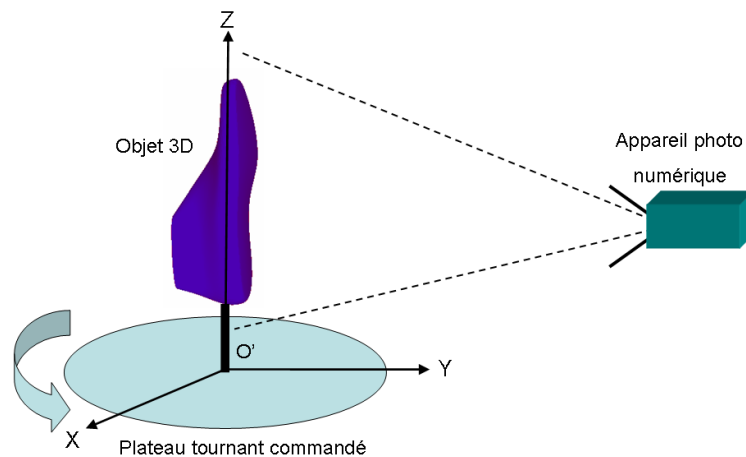


FIG. 1.2 – Système d'acquisition des photographies de l'objet 3D.

La chaîne d'acquisition est divisée en trois parties représentant les différentes étapes de l'algorithme d'acquisition par silhouettes (*Shape from Silhouettes*). La première étape est le calibrage de la caméra. Cette étape a besoin d'une photo d'une mire dont la géométrie est connue. La mise en correspondance de certains points caractéristiques de la mire extraits de l'image serviront à calculer la matrice de projection de l'appareil photo numérique. La seconde étape consiste à acquérir des photos de l'objet sous plusieurs

angles et d'en extraire les silhouettes. La troisième étape utilise la matrice de projection et les silhouettes déjà obtenues afin de décimer un volume de voxels. Une méthode des *marching cubes* est ensuite utilisée sur le volume afin de construire une surface triangulée. Le schéma Figure 1.3 illustre la chaîne de digitalisation utilisée pour la reconstruction d'un objet 3D sous la forme d'un maillage triangulé.

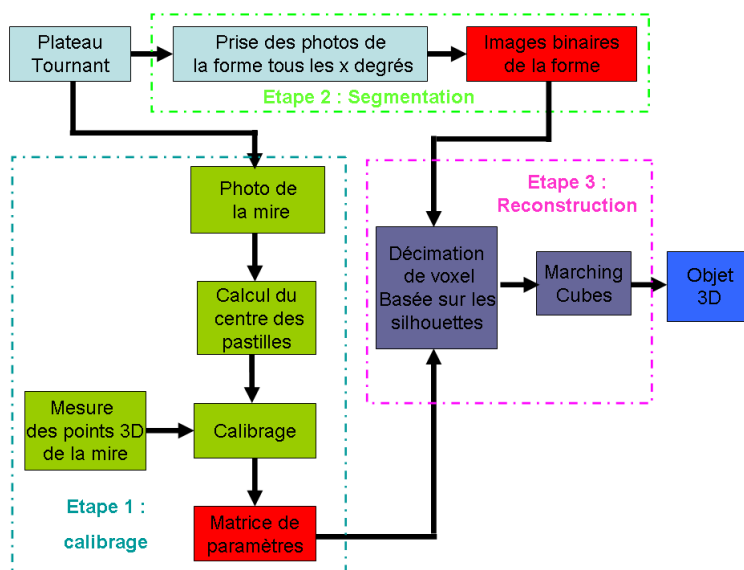


FIG. 1.3 – Schéma général de la chaîne de digitalisation par silhouettes.

1.1.3 Calibrage de caméra

La première étape pour effectuer une reconstruction 3D est l'étalonnage du système d'acquisition des images. Autrement dit, il faut calibrer le système qui est composé d'une caméra et d'un plateau tournant. Calibrer une caméra revient à connaître ses paramètres intrinsèques (ce qui définit la projection) et ses paramètres extrinsèques (qui définissent la position de la caméra relativement à la scène observée). Pour cela il faut modéliser la projection c'est à dire définir une fonction permettant de relier un point de l'espace 3D avec sa projection sur la rétine de la caméra. Les points dans l'espace 3D sont obtenus à l'aide d'une mire. La mire est un modèle tridimensionnel dont certains points caractéristiques sont facilement identifiables, celle-ci étant souvent représentée par un damier. Après avoir pris la mire en photo il est possible de déterminer les points caractéristiques sur l'image de la mire. L'étalonnage proprement dit consiste à identifier les paramètres permettant la mise en correspondance des points 3D réels de la mire et des points 2D de l'image de la mire.

1.1.3.1 Géométrie projective

Le système optique d'une caméra peut être modélisé par une lentille convergente. Les paramètres tels que la focale et l'agrandissement sont liés aux caractéristiques de cette lentille. Nous avons modélisé la lentille de la caméra supposée être une lentille mince par une lentille d'épaisseur négligeable. La lentille est donc ramenée sur un axe d'origine O . Dans la Figure 1.4, le point O correspond au centre optique de la lentille et l'axe Oz est l'axe optique du système. La distance focale f est définie par la distance OF entre le plan image et le centre optique. Le repère lié à la caméra est défini par le point de vue O , centre optique de la caméra, et l'axe optique Oz passant par O , perpendiculairement au plan image. Les axes Ox et Oz sont respectivement parallèles aux colonnes et lignes des points de l'image. Le repère de l'image est un repère bidimensionnel (u, v) . Dans ce repère, les coordonnées sont notées en pixels. L'équation du plan de l'image dans le repère de la caméra est $z = f$, où f est la focale de la caméra en mm . Un point B se projette dans le plan image le long d'une droite passant par O . Soient x, y et z les coordonnées du point B dans le repère qu'on vient de décrire. Dans ce même repère les coordonnées de la projection de B dans le plan image sont :

$$\begin{cases} x' = \frac{fx}{z} \\ y' = \frac{fy}{z} \\ z' = f \end{cases} \quad (1.1)$$

On peut écrire cette transformation sous forme matricielle :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Nous avons donc adopté les coordonnées homogènes. Les coordonnées homogènes de B sont $(x, y, z, 1)$ et celles de b (sa projection) sont :

$$\begin{bmatrix} sx' \\ sy' \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

1.1.3.2 Transformation caméra image

La transformation caméra/image transforme un point p de coordonnées $(x', y', z')^t$ du repère caméra en un point de coordonnées (u, v) du repère image. Les coordonnées de ce point sont en pixels. Nous devons alors introduire les paramètres u_0, v_0 , coordonnées de l'intersection de l'axe focal avec le plan image et k_u, k_v les résolutions verticale et horizontale en $pixels/mm$. La transformation caméra/image s'écrit alors :

$$\begin{cases} u = -k_u x' + u_0 \\ v = -k_v y' + v_0 \end{cases} \quad (1.4)$$

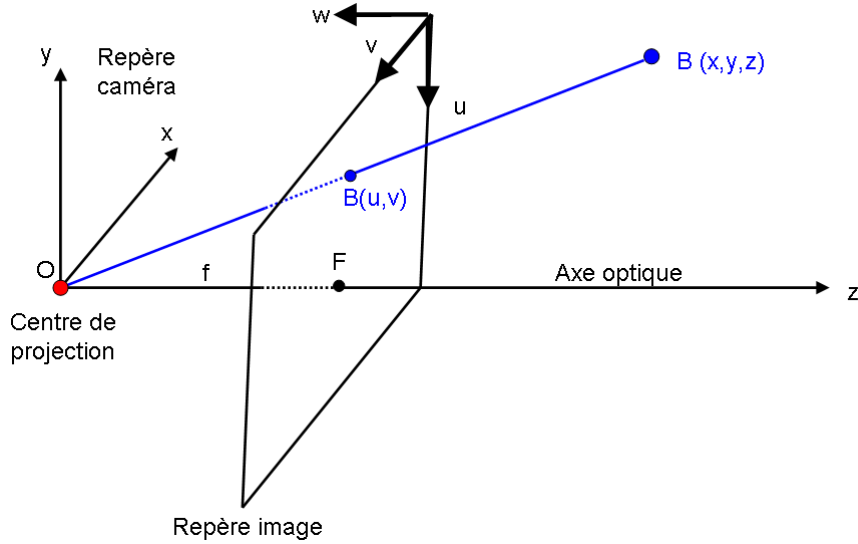


FIG. 1.4 – Modèle géométrique simple d'une caméra.

En fusionnant les équations 1.1 et 1.4 nous obtenons :

$$\begin{cases} u = -k_u \frac{fx}{z} + u_0 \\ v = -k_v \frac{fy}{z} + v_0. \end{cases} \quad (1.5)$$

Ce qui peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ s \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

avec B :

$$B = \begin{bmatrix} -k_u f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & k_v f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

La transformation surface 3D/image s'écrit ainsi sous la forme d'une matrice 3×3 appelée matrice de projection perspective et notée B . Ces deux transformations définissent les paramètres internes d'une caméra qui sont u_0, v_0, k_u, k_v et f .

1.1.3.3 Les paramètres extrinsèques

Les paramètres externes correspondent aux paramètres de transformation entre le repère de la scène et celui de la caméra. Cette transformation peut se décomposer en trois translations et trois rotations. Soit $P(X, Y, Z, 1)^t$ un point de la mire défini dans

le repère de la mire et représenté Figure 1.5. Ce point sera transformé dans le repère de la caméra, en un point $p(x, y, z, 1)^t$ suivant la relation :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t, \quad (1.8)$$

où $t = (T_x, T_y, T_z)^t$ représente le vecteur de translation entre l'origine du repère de la mire et l'origine O du repère de la caméra, et où R représente une matrice 3×3 égale au produit des trois matrices de rotation autour des trois axes localisant le repère de la mire par rapport à celui de la caméra.

La transformation rigide (rotation et translation) peut s'écrire sous la forme d'une transformation homogène :

$$A = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

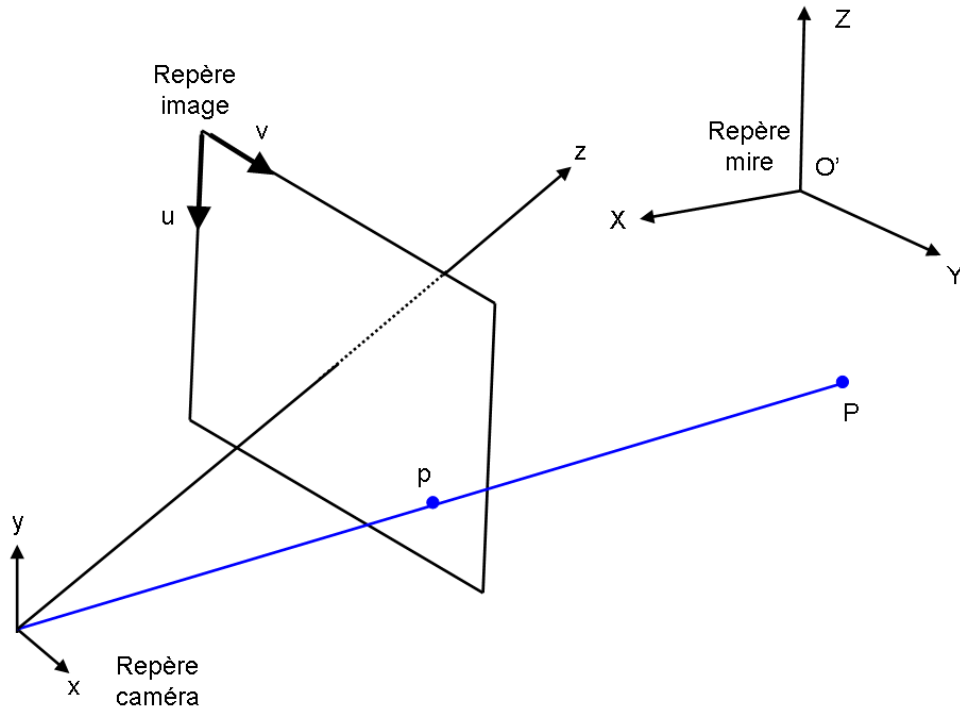


FIG. 1.5 – Les différents repères utilisés.

Les paramètres externes de la caméra ainsi décrits sont donc au nombre de six ; trois translations et trois rotations. Ils permettent, dans notre étude, de localiser la surface

dans le repère de la caméra. Ces paramètres ne dépendent pas des caractéristiques propres de la caméra mais de la position de la scène par rapport à la caméra.

1.1.3.4 La transformation mire/image

Nous pouvons maintenant écrire la transformation mire/image sous la forme d'une matrice 3×4 appelée matrice de projection perspective :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ s \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

avec M :

$$M = BA \quad (1.11)$$

$$= \begin{bmatrix} -k_u f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & k_v f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$$= \begin{bmatrix} -k_u f r_1 + u_0 r_3 & -k_u f t_x + u_0 t_z \\ -k_v f r_2 + v_0 r_3 & -k_v f t_y + v_0 t_z \\ r_3 & t_z \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

où $r_i = (r_{i1} \ r_{i2} \ r_{i3})$. Cette matrice de projection perspective M peut s'écrire sous la forme :

$$M = \begin{bmatrix} [m_1]_{(1 \times 3)} & m_{14} \\ [m_2]_{(1 \times 3)} & m_{24} \\ [m_3]_{(1 \times 3)} & m_{34} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

avec $m_i = (m_{i1}, m_{i2}, m_{i3})$.

On suppose connaître les coordonnées 3D $X_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ de N points P_i et de leurs projections 2D $U_i = (u_i, v_i)^T$. Ces points ne sont pas coplanaires et $N > 5$. Retrouver la matrice de projection perspective P revient donc à résoudre le système 1.1 pour N points. Nous avons choisi d'utiliser la méthode de Faugeras et Toscani afin de résoudre le problème [FT87]. C'est une technique non linéaire utilisant les moindres carrés.

En considérant les N points 3D et leurs projections 2D, le système à résoudre peut alors être exprimé sous la forme suivante :

$$C_{(2N \times 9)} \cdot X_{1(9 \times 1)} + D_{(2N \times 3)} \cdot X_{2(3 \times 1)} = O_{(2N \times 1)}, \quad (1.15)$$

avec

$$\begin{cases} X_1^T = [[m_1] \ m_{14} \ [m_2] \ m_{24} \ m_{34}] \\ X_2^T = [m_3] \end{cases} \quad (1.16)$$

$$C = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1 \\ & & & & \cdot & & & & \\ & & & & \cdot & & & & \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_n \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

$$D = \begin{bmatrix} -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ & \cdot & \\ & \cdot & \\ -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

P étant défini à un facteur près, nous choisissons d'imposer la contrainte $\|I_3\|^2 = 1$ qui exploite la propriété d'orthogonalité de la matrice de rotation. La méthode des multiplicateurs de Lagrange permet alors de résoudre ce nouveau système en tenant compte de la contrainte imposée. Le critère à minimiser au sens des moindres carrés est :

$$\phi = \|CX_1 + DX_2\|^2 + \lambda(1 - \|X_2\|^2). \quad (1.19)$$

Après dérivation par rapport aux inconnues X_1 et X_2 nous obtenons :

$$X_1 = -(C^T C)^{-1} C^T D X_2, \quad (1.20)$$

et

$$EX_2 = \lambda_2 \text{ avec } E = D^T(I_d - C(C^T C)^{-1}C^T)D. \quad (1.21)$$

L'équation 1.21 énonce que X_2 est un vecteur propre de E de valeur propre associée λ . Pour minimiser le critère ϕ , il suffit donc de déterminer la plus petite valeur propre de E ainsi que son vecteur propre associé. Une fois X_2 estimé, il reste à calculer X_1 à partir de l'équation 1.20.

1.1.4 Acquisition, segmentation

Cette partie détaille l'étape d'acquisition des photos ainsi que l'extraction des silhouettes de l'objet 3D. Dans un premier temps l'objet 3D à digitaliser est placé sur l'axe de rotation du moteur. Un pas P représentant l'angle entre chaque photo est choisi, par exemple avec $P = 10^\circ$, 36 photos sont nécessaires pour couvrir les 360° autour de l'objet. L'objet va ensuite tourner à l'aide du moteur commandé en rotation, le moteur marque une pause tous les P degrés afin de laisser le temps à l'appareil de prendre une photo. Une fois la photo prise il faut en extraire la silhouette, pour cela il existe une multitude de méthodes. La Figure 1.6.a illustre l'image originale acquise par la caméra. Nous avons essayé plusieurs méthodes afin d'en extraire la silhouette,

une méthode de seuillage automatique dont le résultat est illustré Figure 1.6.b et une méthode utilisant les k-means dont le résultat est illustré Figure 1.6.c. Ces deux méthodes restent sensibles aux changements d'éclairage et des défauts apparaissent sur le talon de la chaussure. Comme nous avons la possibilité d'effectuer une photo avant le positionnement de l'objet 3D nous avons essayé une méthode par différence entre une photo du fond (sans l'objet) et les photos prises avec l'objet, cette méthode a donné de bons résultats illustrés Figure 1.6.d. Une étape de détection de contours avec étiquetage est ensuite effectuée afin d'extraire le plus grand contour représentant l'objet 3D, cela permet d'éliminer les erreurs dues à la segmentation. La Figure 1.7 illustre un exemple de détection de contour à partir de l'image de différence.

1.1.5 Reconstruction de la surface de l'objet

L'étape de reconstruction va, à l'aide des silhouettes et de la matrice de projection, nous permettre de reconstruire la surface sous forme d'un maillage triangulé. Cette étape est divisée en deux parties, la première partie, présentée section 1.1.5.1, consiste à construire le volume de voxels représentant l'objet 3D à l'aide des silhouettes, alors que la seconde partie, présentée section 1.1.5.2, nous permet de passer d'une représentation volumique à une surface triangulée à l'aide de l'algorithme des *Marching cubes*.

1.1.5.1 Décimation des voxels

L'objectif de la décimation de voxels est de passer d'un volume cubique de base à un volume représentant l'enveloppe convexe de la forme. Au départ l'ensemble des voxels du cube sont marqués comme étant pleins, ils sont donc considérés comme contenus dans l'objet. Les voxels sont ensuite projetés, à l'aide de la matrice de projection issue du calibrage, sur la première silhouette prise à l'angle 0° . Si les coordonnées du voxel projeté appartiennent à la silhouette de l'objet 3D alors il est laissé marqué comme étant plein, si au contraire elles n'appartiennent pas à la silhouette de l'objet alors le voxel est marqué comme vide et ne sera plus utilisé par la suite. Les Figures 1.8.a et 1.8.b illustrent un exemple de projection et de décimation d'un voxel. Une fois la première silhouette finie l'ensemble des voxels sont tournés autour de l'axe Z en fonction du pas P choisi lors de l'acquisition des photos. Les voxels encore pleins sont ensuite projetés sur la nouvelle silhouette associée à l'angle de rotation et ceux n'appartenant pas à la nouvelle silhouette sont éliminés. Les opérations de rotation et de décimation sont répétées successivement jusqu'à avoir fait le tour complet de l'objet soit 360° . Le résultat obtenu est un volume de voxels englobant la forme de l'objet 3D. La Figure 1.9 illustre un exemple de décimation en 2D avec une image tous les 90° . Remarquons que le principe de faire tourner le volume de voxels et de garder la caméra fixe revient au même que faire tourner la caméra autour de l'objet. Techniquement il est plus facile et plus précis de faire tourner l'objet sur un plateau avec une caméra fixe.

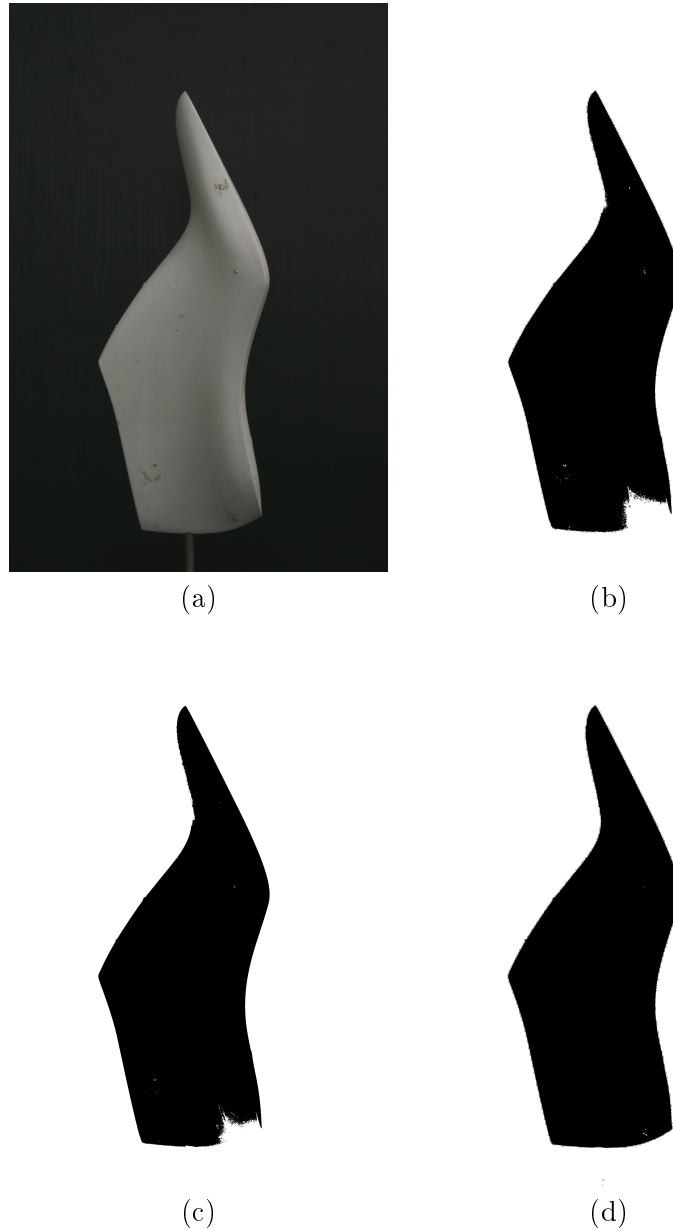


FIG. 1.6 – a) photo originale, b) seuillage automatique, c) K-means avec $K = 2$, d) différence.

1.1.5.2 Algorithme *Marching cubes*

Le volume résultant de l'étape précédente de décimation des voxels à l'aide des silhouettes représente l'enveloppe convexe de l'objet physique. Il est composé de voxels pleins appartenant à l'enveloppe de l'objet et de voxels vides n'appartenant pas à l'enve-

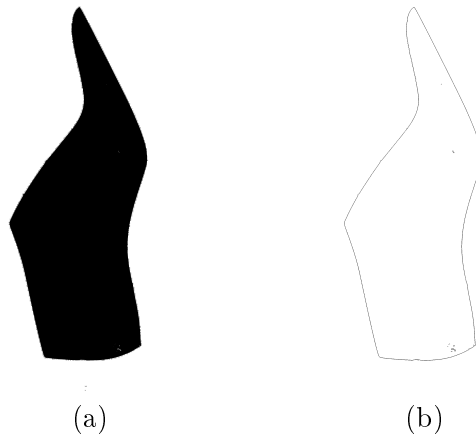


FIG. 1.7 – a) Image après seuillage par différence, b) Image après extraction des contours.

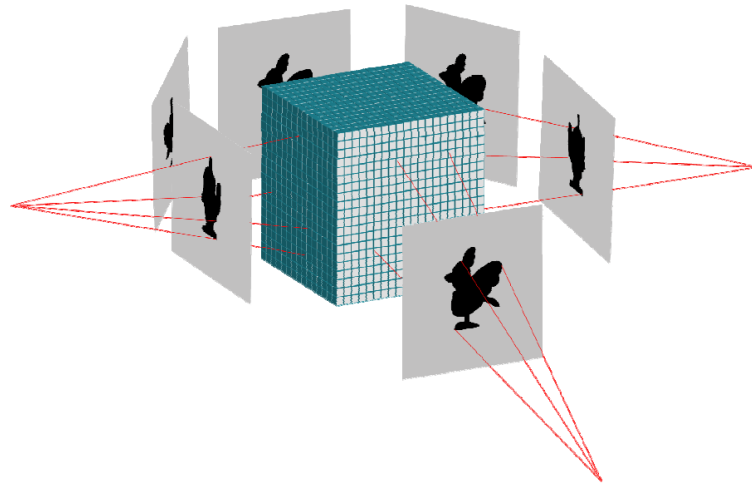
loppe de l'objet. L'étape suivante consiste à passer du volume de voxels à une surface triangulée. La méthode utilisée est l'algorithme des *marching cubes* introduite section 1.2.1 du chapitre 1 de la première partie du document. La méthode est basée sur le voxel qui est le cube unité. Le voxel est composé de huit sommets, chaque sommet peut être considéré comme étant à l'intérieur ou à l'extérieur du volume. Une valeur binaire est associée à chaque sommet, 0 si à l'extérieur et 1 si à l'intérieur. Comme le cube possède huit sommets, $2^8 = 256$ configurations possibles sont autant de façons pour une surface d'intersecter les arêtes du volume. Chaque configuration correspond à un ensemble de facettes tracées à l'intérieur du volume, mais la présence de nombreux cas symétriques permet de se ramener à 15 configurations de base. Ces 15 configurations sont illustrées Figure 1.10 où les sommets des voxels à l'intérieur de la surface sont en bleu lorsqu'ils sont visibles. Les normales aux triangles sont représentées par des flèches lorsqu'elles sont visibles.

1.1.6 Récupération de la couleur

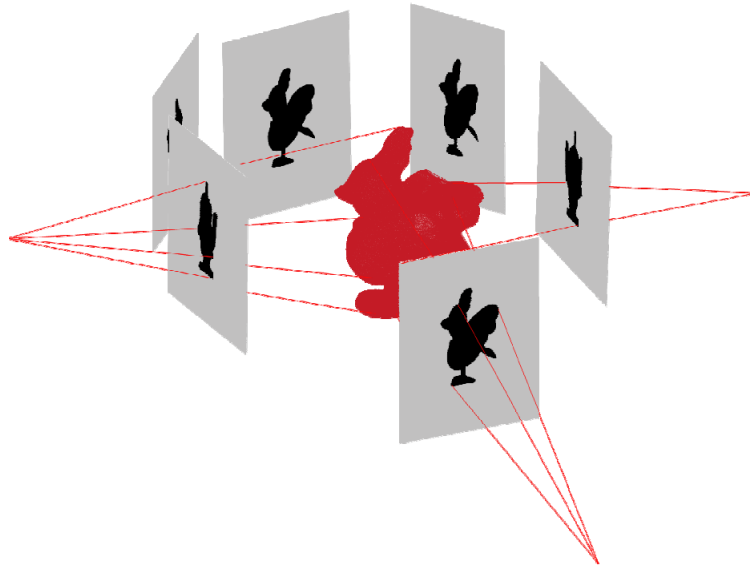
Les sections précédentes montrent comment acquérir la géométrie d'un objet 3D. Nous allons maintenant nous intéresser à la récupération de la couleur ou de la texture de l'objet 3D. Dans cette section nous allons voir dans quel but nous souhaitons obtenir la texture de l'objet. Nous présentons ensuite la méthode utilisée pour récupérer la texture d'un objet digitalisé.

1.1.6.1 Objectifs

Il y a deux objectifs liés à la digitalisation de la texture : l'objectif principal est la récupération des lignes de style. En effet, les stylistes sont très réticents à l'utilisation de logiciel de dessin 3D sur forme. Ils continuent donc à dessiner les lignes de style



(a)



(b)

FIG. 1.8 – a) Exemple de décimation d'un volume de voxels.

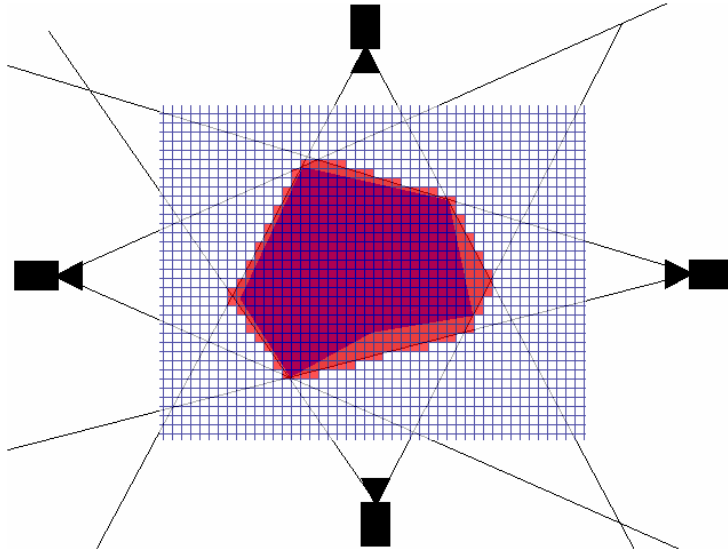


FIG. 1.9 – Méthode de décimation vue de dessus.

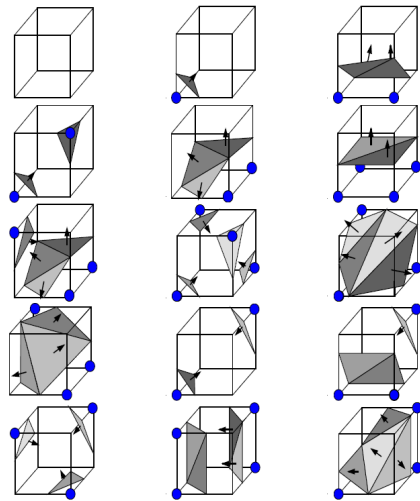


FIG. 1.10 – Les 15 configurations de l'algorithme des *marching cubes*.

directement sur les formes à l'aide de coquilles. Les coquilles, généralement de couleur blanche, sont plaquées sur la forme de chaussure et les stylistes dessinent dessus des lignes de style au crayon. La Figure 1.11.a illustre une forme intérieure de chaussure avec des lignes de style. L'idéal serait de récupérer, lors de la digitalisation de la forme, les lignes de style sous la forme de courbes dans l'espace. La Figure 1.11.b illustre une forme intérieure numérique de chaussure avec des lignes de style. Un autre objectif de la digitalisation de la texture est le rendu de l'objet 3D. Si le digitaliseur est capable d'acquérir la texture alors celui-ci pourra être utilisé pour digitaliser des chaussures réelles. Dans ce cas, même si les objectifs de précision ne sont pas atteints, le fait d'avoir une texture plaquée sur l'objet permet de lui donner un rendu exploitable pour d'autres opérations que l'usinage de la forme. Par exemple, l'objet digitalisé avec la texture peut être rendu transparent et positionné sur une forme intérieure de chaussure vierge. Il est alors possible de tracer des lignes de style sur la forme vierge à l'aide du logiciel de la société en suivant les lignes de l'objet digitalisé mis en transparence. De cette façon il est possible de copier les lignes faites à la main par le styliste sur une forme numérique. Il est aussi possible de plaquer une texture issue du digitaliseur directement sur une forme vierge et d'en copier les lignes de la même façon que précédemment.



FIG. 1.11 – a) Une forme intérieure réelle avec lignes de style, b) Une forme intérieure numérique avec lignes de style.

1.1.6.2 Méthodes de récupération de la couleur

La récupération de la couleur est divisée en deux étapes. La première étape est la recherche de l'image dans laquelle se projette chaque triangle. La seconde étape consiste à projeter le triangle sur l'image de façon à en extraire la couleur ou la texture.

Recherche de l'image La recherche de l'image qui servira à récupérer la texture d'un triangle est basée sur un calcul d'angle. L'angle est calculé entre le vecteur de vue de chaque image et la normale au triangle. Le vecteur de vue est représenté par la droite passant par le centre de l'appareil photo numérique et le centre de l'image. L'image ayant l'angle le plus petit servira pour la récupération de la texture. La Figure 1.12 illustre un exemple de calcul d'angle entre un triangle et plusieurs images. L'angle A_1 représente l'angle entre la normale au triangle et le vecteur de vue de l'image 1 et l'angle A_2 représente l'angle entre la normale et le vecteur de vue de l'image 2. L'angle A_1 est inférieur à l'angle A_2 , c'est donc l'image 1 qui est utilisée pour la récupération de la texture du triangle.

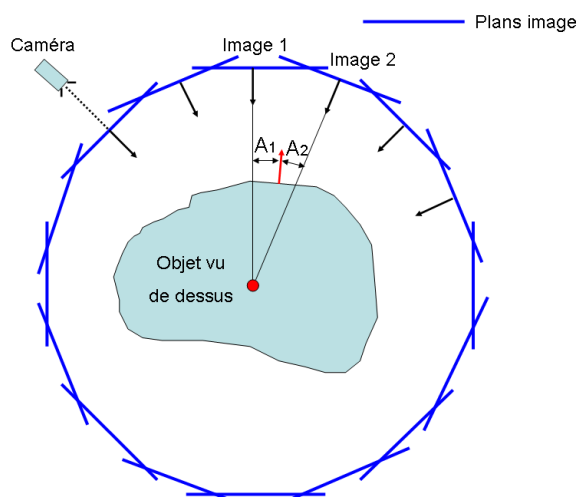


FIG. 1.12 – Exemple de choix d'une image en fonction de la normale à une face.

Extraction de la texture Après avoir choisi les images dans lesquelles va se projeter chaque triangle il faut encore choisir dans les images les pixels qui vont être utilisés pour représenter la couleur ou la texture du triangle. La Figure 1.13 illustre un exemple de projection d'un triangle de l'objet dans une partie de l'image. Une première méthode consiste à projeter la normale du triangle sur l'image afin d'obtenir les coordonnées d'un pixel. La couleur du pixel est utilisée pour colorier le triangle. Une seconde méthode consiste à projeter les trois points du triangle sur l'image. Dans ce cas il est possible de récupérer l'ensemble des pixels de l'image à l'intérieur du triangle projeté est de former une texture qu'il sera possible de plaquer par la suite sur le triangle.

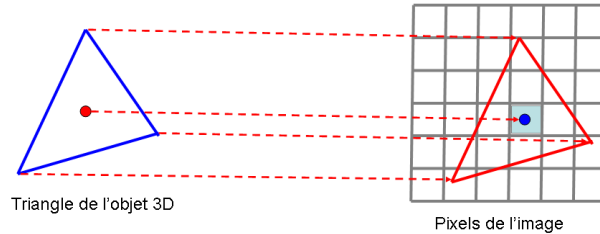


FIG. 1.13 – Projection d'un triangle de l'objet 3D sur l'image afin d'extraire la texture.

1.2 Résultats

Nous avons testé notre digitaliseur 3D sur différents objets. Les résultats sont présentés sur trois objets : une petite horloge en plastique, un robot jouet et une forme intérieure de chaussure sur laquelle nous avons placé quelques marques.

Les Figures 1.14.a-d illustrent la forme intérieure de chaussure digitalisée avec différentes résolutions du volume de voxels. A basse résolution les défauts liés à la représentation en voxels sont visibles.

Les résultats de la digitalisation de la forme et de la texture sont montrés visuellement par une série d'images de l'objet réel prises sur le plateau tournant et une série d'images de l'objet 3D digitalisé prises avec un logiciel de visualisation. Les surfaces des objets sont des maillages triangulés. Le premier objet est une horloge, les Figures 1.15.a-e illustrent des photos de l'objet prises sur le plateau tournant lors de l'acquisition. Les Figures 1.15.f-j illustrent des images capturées à partir d'un programme de visualisation d'objets 3D fait en OpenGL. Le haut de l'horloge est relativement simple et comporte très peu de zones concaves, il est symétrique et proche d'une forme de révolution. Les résultats obtenus sont d'assez bonne qualité, cependant la méthode de récupération de la couleur crée des trames sur l'objet. Cela peut être expliqué par le changement d'illumination entre les prises de vues lors de l'acquisition. La Figure 1.16 illustre le maillage triangulé de l'horloge. Le second objet présenté est un robot, comme pour l'horloge les Figures 1.17.a-e illustrent des photos de l'objet et les Figures 1.17.f-j illustrent des images capturées de l'objet numérique. Le robot présente une géométrie plus complexe que l'horloge, il comporte plusieurs zones concaves au niveau des bras. Ces zones ne sont pas récupérées par notre digitaliseur, ceci est visible sur les Figures 1.17.f-g pour les bras et les détails du visage. La Figure 1.18 illustre le maillage triangulé de l'horloge. Le troisième objet présenté est une chaussure, c'est l'objet qui nous intéresse le plus car c'est le type d'objet sur lequel le digitaliseur doit travailler principalement. Les Figures 1.19.a-e illustrent des photos de l'objet prises sur le plateau tournant lors de l'acquisition. Les Figures 1.19.f-j illustrent des images capturées à partir de l'objet 3D numérisé. Nous remarquons que l'objet est légèrement déformé. En effet la digitalisation a étiré l'objet sur sa longueur. Les erreurs peuvent être dues à la méthode de calibrage de la caméra où des paramètres de distorsion ne sont pas pris en compte. Les erreurs peuvent aussi venir de l'hypothèse que nous avons faite sur les axes de rotation. En

effet, nous avons émis l'hypothèse que l'axe du repère de la mire est superposé avec l'axe de rotation du plateau tournant. Nous avons fait des tests qui ont mis en évidence que les axes ne sont pas toujours bien superposés et que dans ce cas des erreurs peuvent apparaître. Quelques erreurs sont visibles au niveau de la récupération de la couleur sur le devant de la chaussure. Ces erreurs proviennent des normales des triangles qui n'ont pas permis de choisir la bonne image pour récupérer la couleur.

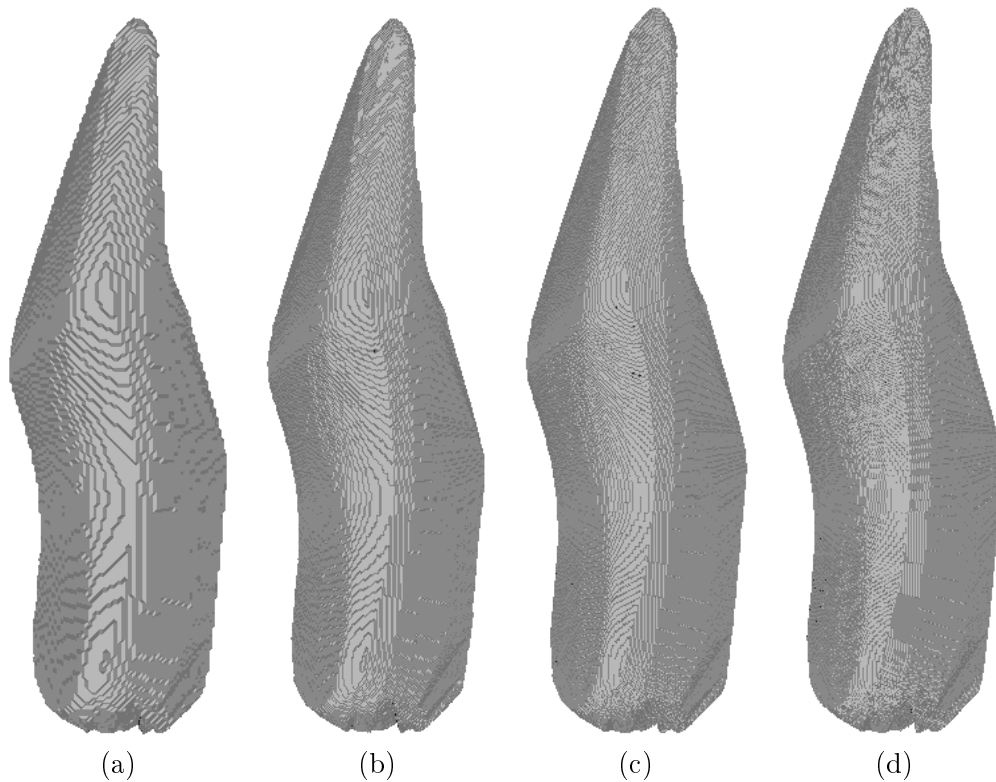


FIG. 1.14 – a) Chaussure construite avec un volume de départ de $100 \times 100 \times 200$ voxels, b) Chaussure construite avec un volume de départ de $200 \times 200 \times 400$ voxels, c) construite avec un volume de départ de $300 \times 300 \times 600$ voxels, d) construite avec un volume de départ de $400 \times 400 \times 800$ voxels.

1.3 Proposition d'amélioration de la digitalisation avec la théorie des possibilités

Le but de cette section est d'améliorer le système de reconstruction par silhouettes. L'idée est d'utiliser une représentation floue pour modéliser le volume de voxels mais aussi pour les pixels de la silhouette [DP85]. En effet quand un voxel se projette à la frontière de la silhouette il n'est pas considéré comme appartenant à l'objet mais une partie de celui-ci est pourtant contenu dans l'objet. La Figure 1.20 illustre un exemple

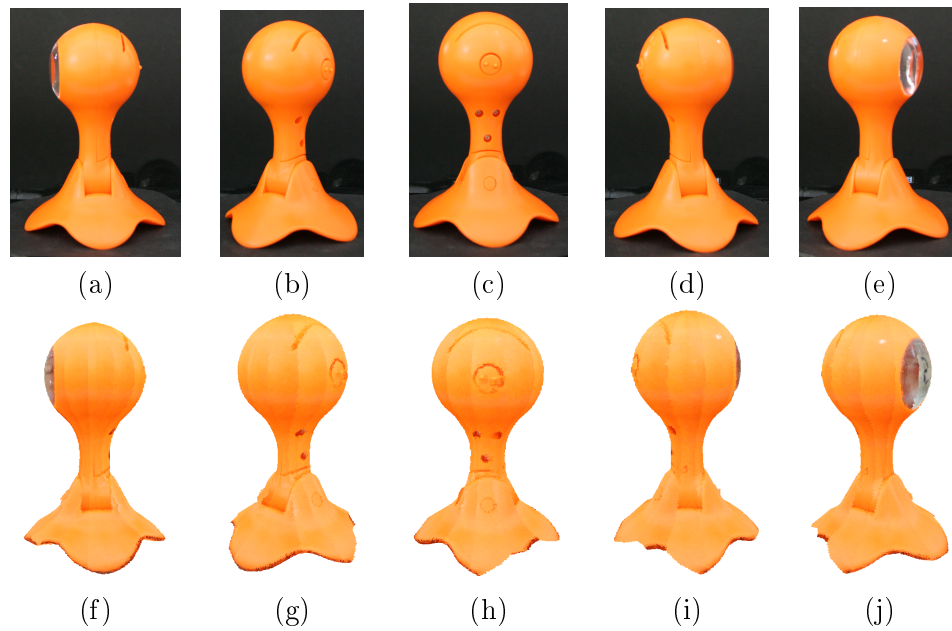


FIG. 1.15 – Les images de (a) à (e) représentent les photos de l’horloge prises sur le plateau tournant. Les images de (f) à (j) représentent l’horloge 3D numérique digitalisé à l’aide de notre digitaliseur aux mêmes angles que les photos.

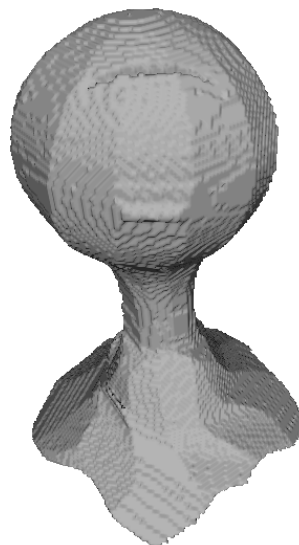


FIG. 1.16 – Représentation du maillage de l’horloge.

en 2D de reconstruction d’un cercle. Les carrés gris représentent les voxels appartenant à la frontière et non contenus dans l’objet.

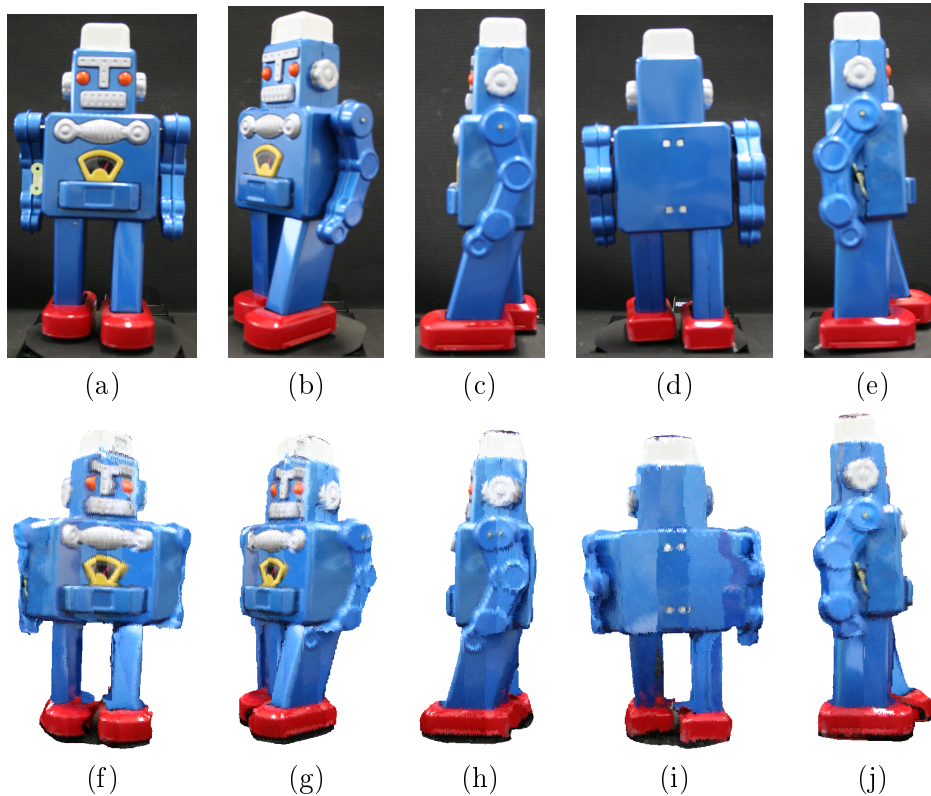


FIG. 1.17 – Les images de (a) à (e) représentent les photos d'un robot prises sur le plateau tournant. Les images de (f) à (j) représentent le robot 3D numérique digitalisée à l'aide de notre digitaliseur aux mêmes angles que les photos.

1.3.1 Analyse des Défauts

Le défaut de l'utilisation d'un échantillonnage en voxel et en pixel est que les deux échantillonnages sont différents. De plus, les images utilisées sont à niveau de gris. Il faut donc définir un seuil sur chaque image originale permettant de séparer la projection de l'objet sur l'image de la projection de la source lumineuse. Ce processus est peu fiable à cause de l'utilisation d'un seuil. Si le seuil choisi est trop élevé, la taille de l'objet reconstruit sera beaucoup plus petite que la taille de l'objet original et certains détails auront disparu. Au contraire un seuil trop élevé donnera un objet de taille surestimée et pourrait prendre en compte trop de détails issus de l'environnement autour de l'objet lui même.

1.3.2 Application de la théorie des possibilités à la reconstruction tridimensionnelle par silhouettes

Dans notre approche, nous utilisons les silhouettes à niveau de gris dans le but de conserver jusqu'à la fin du processus toute l'information qu'elles contiennent. Le but de

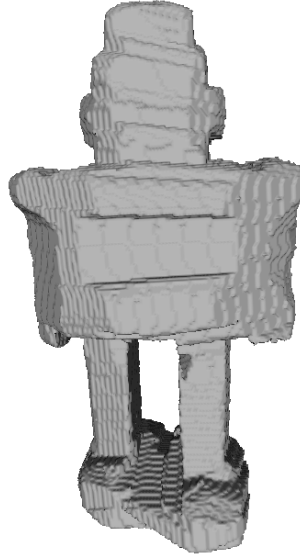


FIG. 1.18 – Représentation du maillage du robot.

ce travail est de projeter les niveaux de gris de l'image sur chaque voxel en prenant en compte la disparité des échantillonnages des images d'une part et des voxels de l'objet à reconstruire d'autre part. Pour ce faire, nous réalisons une agrégation des niveaux de gris via la mesure de confiance définie par les possibilités d'interaction entre chaque pixel de chaque image et chaque voxel du cube original à évier. De cette agrégation résulte l'attribution d'un niveau de gris à chaque voxel. La dernière phase de la reconstruction va consister à seueillir ces niveaux de gris qui est une opération respectant mieux l'information disponible que celle consistant à seueillir les images originales.

Soit V_m un voxel de l'objet et P_n un pixel de l'image, V_m et P_n sont possiblement en interaction si P_n est une projection de V_m via le modèle de projection utilisé. La possibilité d'interaction, notée $\pi_{m,n}$, entre V_m et P_n est la généralisation pondérée de cet indice d'interaction. Le calcul de cette possibilité est obtenu par généralisation floue du test d'appartenance d'un pixel à la projection d'un voxel.

Chacun des voxels est projeté sur chacune des images que nous utilisons. La projection d'un voxel a pour chaque image une forme différente car notre volume de voxels effectue une rotation autour de l'axe Z du repère de la mire. Cette projection nous permettra de tester la possibilité de chacun des pixels d'appartenir à la projection du voxel. Dans la section 1.3.2.1 nous présentons la possibilité d'interaction binaire entre un voxel et un pixel. Dans la section 1.3.2.2 nous présentons la possibilité d'interaction floue.

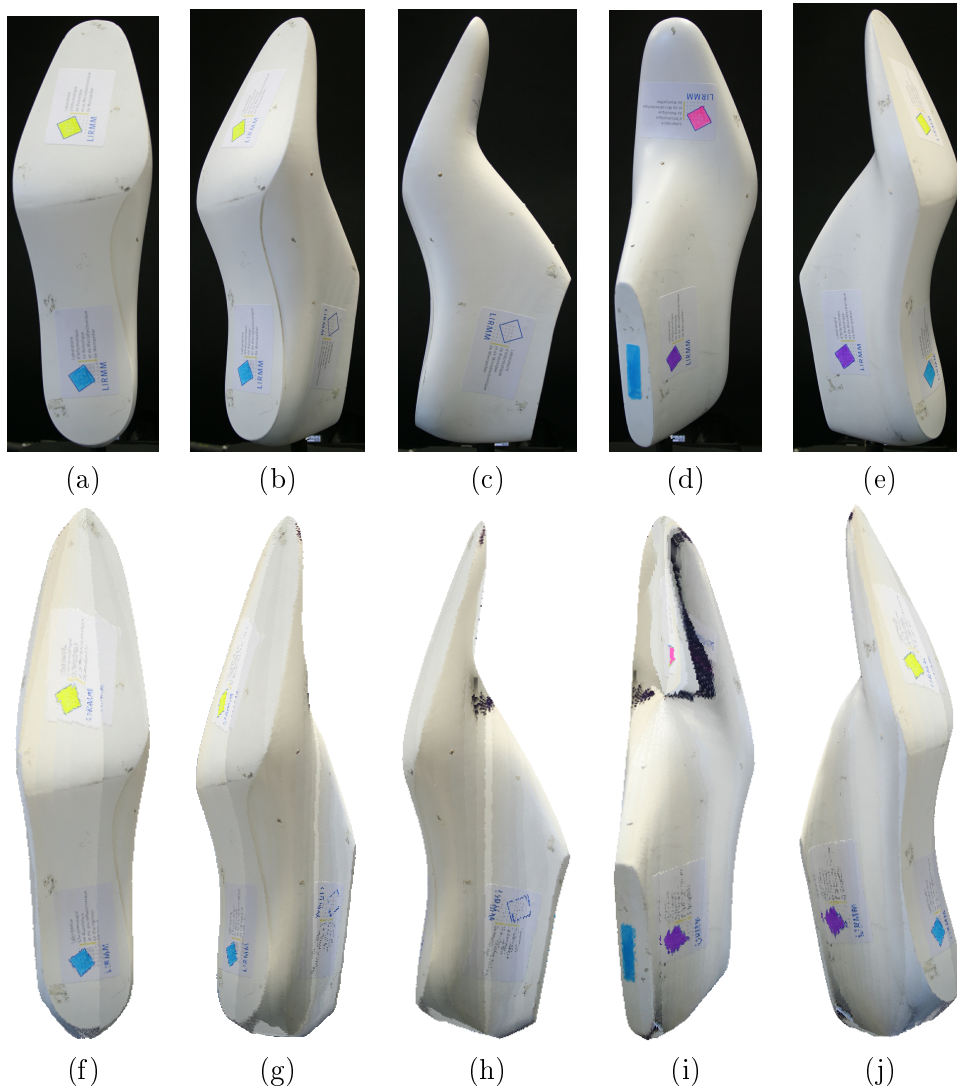


FIG. 1.19 – Les images de (a) à (e) représentent les photos d’une chaussure prises sur le plateau tournant. Les images de (f) à (j) représentent la chaussure 3D numérique digitalisée à l’aide de notre digitaliseur aux mêmes angles que les photos.

1.3.2.1 Possibilité binaire d’interaction

Soient P_1 , P_2 , P_3 et V respectivement la projection de trois pixels et d’un voxel sur une image binaire. Un exemple de possibilité d’interaction entre le voxel V et les trois pixels P_1 , P_2 , P_3 pour des images binaires est présenté Figure 1.21. Dans cet exemple de projection P_3 et P_2 sont respectivement à l’intérieur et à l’extérieur de la projection du voxel sur l’image, alors que P_1 interagit de façon partielle avec cette même projection. Si le partitionnement des images et/ou des voxels change, un pixel comme P_1 pourra

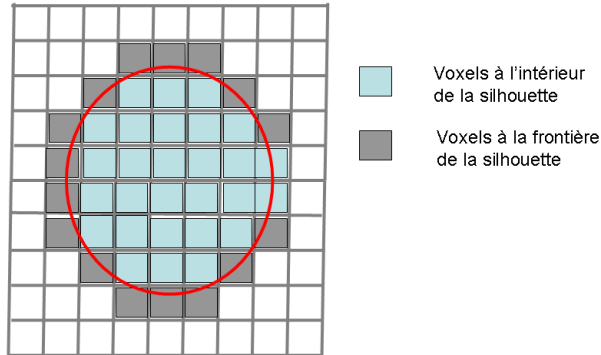


FIG. 1.20 – Illustration du problème à la frontière de l'objet.

appartenir ou non à la projection d'un voxel. La définition binaire des interactions produit une mesure qui est trop sensible à l'arbitraire du choix du partitionnement des images et des voxels. Pour régulariser cette approche nous proposons de remplacer les interactions binaires par des interactions floues.

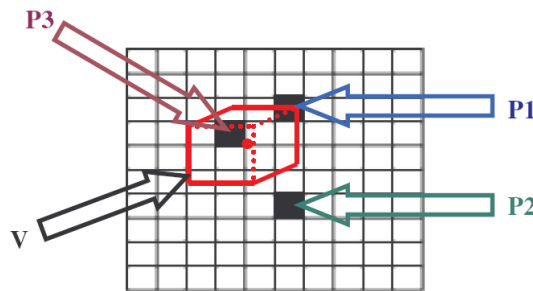


FIG. 1.21 – Possibilité binaire d'interaction entre un voxel et des pixels binaires.

1.3.2.2 Possibilité floue d'interaction

Afin de définir la possibilité d'interaction entre un pixel et un voxel, de façon à prendre en compte la disparité d'échantillonnage entre la partition en voxel du volume de travail et la partition en pixel de l'image, nous allons généraliser notre problème de manière floue en utilisant la méthode de Strauss et Comby [SC07]. Un pixel flou est illustré Figure 1.22.a. La représentation en pixel flou permet de pallier l'arbitrage du choix du seuillage des images. La représentation en voxel flou, illustré Figure 1.22.b permet de pallier l'arbitrage du choix du partitionnement en voxel.

Contrairement à la projection d'un pixel flou, un voxel flou a une projection différente sur chaque image du fait de la rotation du volume de travail dans la reconstruction de

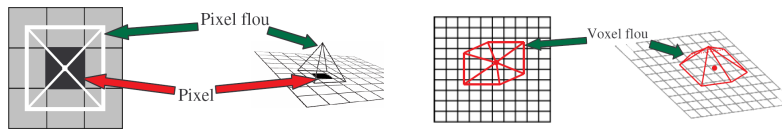


FIG. 1.22 – a) Projection d'un pixel flou, b) Projection d'un voxel flou.

l'objet. La Figure 1.23 illustre des exemples de projection d'un voxel suivant différents angles.

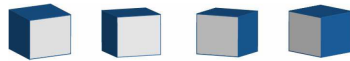


FIG. 1.23 – Exemples de projection d'un voxel sur une image suivant différents angles.

Le calcul du degré d'interaction entre un pixel flou et un voxel flou est fait en projetant sur un axe x et un axe y l'image du voxel et du pixel suivant l'axe x et l'axe y de l'image. La Figure 1.24 illustre la projection d'un pixel et d'un voxel flou sur les deux axes d'une image. Pour chacun des pixels qui possèdent une interaction avec la projection d'un voxel, nous allons effectuer ce même test afin de connaître leur degré d'interaction. Ce test nous donne la possibilité $\pi_{m,n}$ que possède le pixel P_n à interagir avec le voxel V_n .

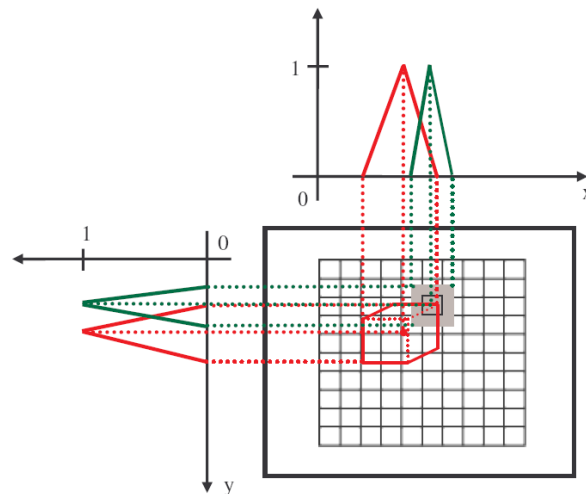


FIG. 1.24 – Possibilité floue d'interaction entre un pixel flou et un voxel flou.

A partir de données recueillies une note maximale et une note minimale sont calculées pour chacun des voxels. Cette note est calculée à l'aide de l'intégrale de Choquet

discrète [Cho60]. L'intégrale de Choquet est un opérateur d'agrégation utilisant des mesures de confiance non additives qui généralise la moyenne arithmétique pondérée. L'obtention du volume de l'objet est fait par un seuillage des voxels à l'aide des notes attribuées. A cause des problèmes non résolus de recalage des axes, ainsi que la précision dû au temps de calcul, il ne nous a pas paru intéressant pour le moment d'appliquer cette amélioration sur le système de digitalisation présent section 1.1.

Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode de digitalisation d'objet 3D basée sur les silhouettes. Cette méthode fait des acquisitions d'un objet en rotation sur un plateau afin d'en extraire les silhouettes. Ces silhouettes sont ensuite utilisées pour décimer un volume de voxel. La forme finale est obtenue par un *marching cubes* sur les voxels restant. Les résultats obtenus sur des formes simples semblent satisfaisants cependant les formes qui nous intéressent sont les formes de chaussure et pour celles-ci la distorsion engendrée par le digitaliseur est trop importante pour que les formes issues du digitaliseur soient utilisables. Afin de rendre le digitaliseur plus précis il reste encore quelques modifications à faire. La première de ces modifications est l'amélioration du système de calibrage des caméras. En effet celui que nous utilisons ne prend pas en compte toutes les distorsions apportées par les caméras. Une autre modification nécessaire pour améliorer le système serait d'identifier l'axe de rotation du moteur. Nous utilisons l'hypothèse que les axes de rotation du moteur et du repère de calibrage sont superposés. Des tests d'identification de ces axes montrent que plus l'objet est loin de la base du plateau plus les axes se séparent. Cette différence entre les axes engendre des erreurs qu'une identification de l'axe de rotation pourrait enlever. Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode d'amélioration de la digitalisation utilisant une représentation floue pour modéliser les voxels et les pixels. Cette approche pourrait améliorer le processus de digitalisation, il reste encore des tests à faire sur cette partie afin de le rendre utilisable. Enfin pour ce qui est de la couleur, un changement de l'espace couleur RGB utilisé en un espace couleur où l'illumination est séparée permettrait de réduire le tramage des couleurs sur les objets dû à la différence d'illumination entre les prises de vues.

Chapitre 2

Tatouage d'objets 3D pour l'enrichissement de contenu

Introduction

Dans ce chapitre nous détaillons deux nouvelles méthodes permettant de dissimuler des données dans des objets 3D sans modifier la position des sommets. L'idée principale des deux méthodes présentées est de trouver et de synchroniser des zones particulières dans l'objet 3D pouvant être utilisées pour insérer le message. L'insertion de données s'appuie sur la modification de la connexité des arêtes dans les zones sélectionnées composées de quadrangles. Ces modifications ont pour conséquence de modifier la structure des triangles construits dans ces zones. Ces méthodes de dissimulation présentent l'avantage de ne pas modifier la position initiale des points du modèle 3D. La différence entre les deux méthodes présentées est la manière de sélectionner et de synchroniser ces zones d'insertion. Alors que la première méthode, présentée section 2.1, s'appuie sur un arbre couvrant minimum (ACM), la seconde méthode, présentée section 2.2, utilise un axe sur lequel sont projetés les centres des zones d'insertion. Ces deux méthodes aveugles, protégées par utilisation de clefs secrètes, résistent à des transformations géométriques tels que les rotations, translations ou changements d'échelle et ne sont pas perturbées par des modifications directes de l'ordre des données dans les fichiers originaux. Ces approches trouvent un intérêt certain pour des objets 3D dont les sommets ont été acquis avec une grande précision et dont la modification n'est pas acceptable. Dans cette catégorie de méthode qu'est le tatouage topologique nous avons présenté deux algorithmes dans l'état de l'art section 2.3.2 de la première partie de ce document. Le premier algorithme TSPS de Ohbuchi *et al.* permet de tatouer le message dans une bande de triangles déconnectée ensuite du maillage de l'objet [OMA97]. Le second algorithme de Mao *et al.* consiste à ajouter des triangles plus petits à l'intérieur des triangles initiaux de l'objet 3D dans lequel l'information cachée est insérée. Ces deux algorithmes présentent l'inconvénient d'augmenter la taille du fichier lors de la phase de tatouage.

2.1 Méthode d'insertion basée sur l'ACM

Dans cette section nous présentons l'approche d'insertion de données cachées basée sur un arbre couvrant minimum (ACM). Cette approche est composée de trois étapes. La première étape consiste à construire un ACM à partir des sommets initiaux du modèle 3D. La seconde étape nécessite de parcourir l'ACM construit afin de sélectionner des zones pour l'insertion des données. Le point de départ utilisé pour parcourir le graphe est obtenu à partir d'une clef secrète. A partir d'une analyse en composante principale (ACP) de l'objet 3D, la clef secrète nous permet, dans le repère de l'objet, de localiser le point de départ de l'ACM. Du fait de cette ACP, une réorganisation du fichier ne perturbe pas la localisation de ce point de départ qui ne dépend donc que de la clef secrète. Les zones d'insertion doivent répondre à plusieurs contraintes dues à la connexité de l'ACM et à la géométrie de la zone. La troisième étape concerne l'insertion du message lui-même. Celle-ci est faite en modifiant la connexité des triangles dans les zones sélectionnées. La Figure 2.1 illustre le schéma général de cette première méthode.

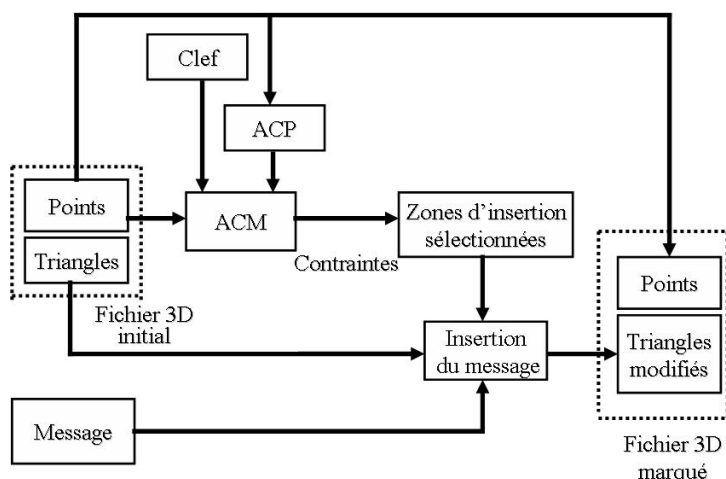


FIG. 2.1 – Présentation générale de la méthode d'insertion basée sur un ACM.

En section 2.1.1 nous détaillons la définition d'un ACM et présentons sa construction. Nous montrons, section 2.1.2, comment sélectionner les zones d'insertion afin de les synchroniser avec le message. La méthode d'insertion de données cachées est décrite dans la section 2.1.3. Nous montrons, section 2.1.4, que les zones d'insertion sélectionnées sont soumises à des contraintes géométriques. La section 2.1.5 décrit comment extraire le message dans un fichier 3D marqué. Enfin, la section 2.1.6 présente les résultats obtenus avec cette méthode d'insertion.

2.1.1 Arbre couvrant minimum

L'arbre recouvrant de poids minimum (ARPM) ou arbre couvrant minimum (ACM) est un graphe qui couvre l'ensemble des sommets d'un maillage. Il est basé sur le calcul

de la distance euclidienne entre deux sommets.

2.1.1.1 Définition

Soit G un graphe formé d'un ensemble de couple de sommets représentant une relation. Soient a et b deux sommets de ce graphe qui sont en relation, le couple (a, b) est donc une arête du graphe G . Soit A un arbre non orienté connexe sans cycle du graphe, dans cet arbre il n'existe donc pas de chemin relié à un sommet de A qui permette de revenir sur ce même sommet. Ce graphe respecte alors deux propriétés :

- Si une arête est enlevée, il n'est alors plus connexe.
- Si une arête est ajoutée, celle-ci forme alors un cycle.

Pour le graphe G , il existe au moins un arbre couvrant A . Il s'agit d'un graphe partiel qui possède les mêmes sommets que G et dont l'ensemble des relations est inclus dans celui des relations de G . Le coût du graphe G correspond à la somme de toutes les pondérations des arêtes de G . Si A est un arbre couvrant de G dont la somme des pondérations de ses arêtes est la plus petite valeur par rapport à celle de tous les autres arbres couvrant de G , alors A est appelé *arbre couvrant de poids minimum de G* et noté ACM. Dans notre méthode le poids utilisé pour calculer l'ACM est la distance euclidienne entre les points de l'objet 3D. La particularité d'un ACM est qu'il est unique, il existe cependant une ambiguïté dans les méthodes de construction lorsque un sommet possède deux arêtes de même poids. La méthode choisit l'arête qu'elle rencontre en premier dans son parcours des sommets. Si l'ordonnancement des sommets dans le fichier est modifié alors l'ACM lui aussi pourrait être modifié. Pour pallier à cette ambiguïté un calcul de distance entre les deux sommets des deux arêtes identiques et le centre de masse de l'objet est utilisé. De cette façon **l'ACM est bien unique quelle que soit la réorganisation des points dans le fichier de l'objet 3D**. C'est cette particularité forte des ACM que nous utilisons section 2.1.2 afin de synchroniser le message avec le modèle 3D. Nous nous appuyons également sur cette caractéristique pour insérer les données présentée section 2.1.3.

2.1.1.2 Construction du graphe d'arêtes

La construction de l'ACM est basée sur un graphe de voisinage, il faut donc construire le graphe de voisinage des points avant de construire l'ACM. Afin de résister au remaillage ou aux changements de la connexité du maillage de l'objet 3D il nous faut construire un graphe indépendant de la topologie du maillage de l'objet. Le graphe va donc être construit uniquement à partir du nuage de points. Nous utilisons pour le construire la distance euclidienne entre les points. La première étape consiste à ranger les points dans des voxels. Une sphère est ensuite positionnée sur chaque point. La distance entre le point au centre de la sphère et tous les autres points du voxel est calculée. Tous les points contenus dans la sphère seront reliés au point central par une arête. Si la sphère dépasse la limite du voxel, les calculs de distance des points des voxels où la sphère déborde seront aussi effectués. Cette méthode de construction du graphe permet de limiter le nombre de calcul de distance aux points appartenant au voxel et aux points

des voxels voisins dans les cas où la sphère déborde. La Figure 2.2 illustre un exemple en 2D de construction du voisinage d'un point contenu dans le voxel 1 et dont la sphère déborde sur les voxels 2, 3 et 4.

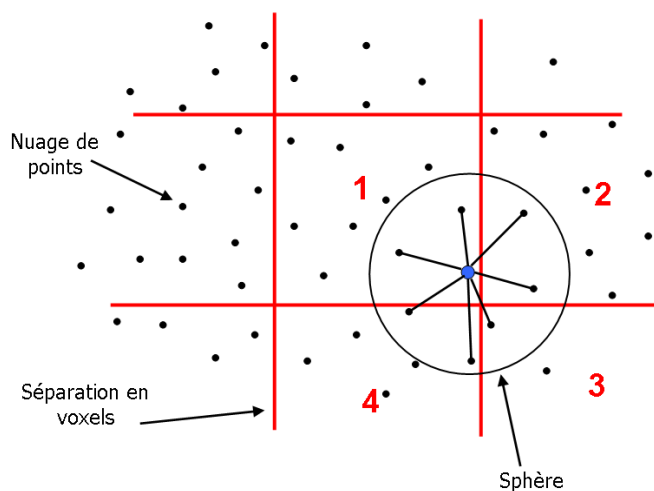


FIG. 2.2 – Construction du graphe de voisinage.

2.1.1.3 Construction de l'ACM

Dans cette section nous détaillons la méthode de construction de l'ACM. L'ACM est construit à l'aide du graphe de voisinage présenté précédemment. Pour cela il existe plusieurs algorithmes, les plus connus sont l'algorithme de *Prim* [Pri57] et l'algorithme de *Kruskal* [Kru56].

L'algorithme de Prim construit progressivement un sous-graphe A de G en choisissant l'arête de poids minimum localement à chaque étape [Pri57]. Au départ, A est vide et un sommet s de G est choisi comme point de départ. A est alors uniquement composé de s . Soit E l'ensemble des sommets en relation avec s dans A , soit F l'ensemble des sommets restants. Au départ E est donc vide, et F contient tous les sommets de G . A chaque étape une arête est ajoutée à A telle que cette arête soit de poids minimum parmi toutes les arêtes ayant un sommet x la composant dans F et l'autre dans E . Ceci permet de ne pas former de cycle. Ainsi le sommet x sort de l'ensemble F et est inséré dans E . L'algorithme s'arrête quand l'ensemble F est vide. La complexité de l'algorithme de Prim est $O(A \log(S))$ où A représente le nombre d'arêtes et S le nombre de sommets du graphe.

L'algorithme de Kruskal construit progressivement un sous-graphe A de G en triant d'abord l'ensemble des arêtes selon leur poids et ensuite en sélectionnant celles qui ne formeront pas de cycle dans A [Kru56]. Pour cela, les sommets sont choisis un

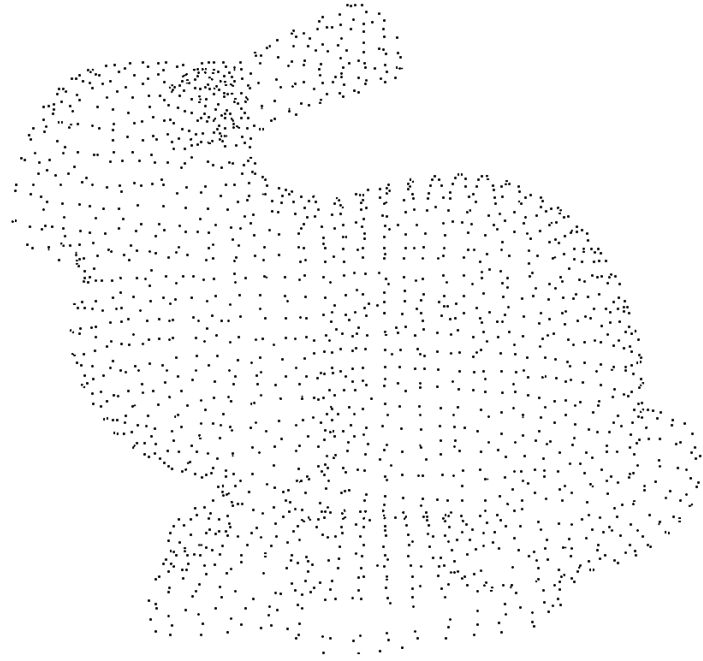
par un et triés dans l'ordre croissant selon la pondération de l'ensemble des arêtes qui lient un sommet s aux autres. Pour chaque arête (s, s') triée il faut vérifier si la liste des voisins de s dans A est différente de celle de s' dans A . Si aucun sommet voisin n'est commun, alors l'arête (s, s') est ajoutée à A . La complexité de l'algorithme de Kruskal est $O(A \log(S))$ où A représente le nombre d'arêtes et S le nombre de sommets du graphe.

Les Figures 2.3 et 2.4 illustrent des exemples d'ACM sur des objets 3D représentant un lapin et une forme intérieure de chaussure. Les Figures 2.3.a et 2.4.a représentent les nuages de points associés aux objets 3D et les Figures 2.3.b et 2.4.b représentent les ACM construits à partir des nuages de points.

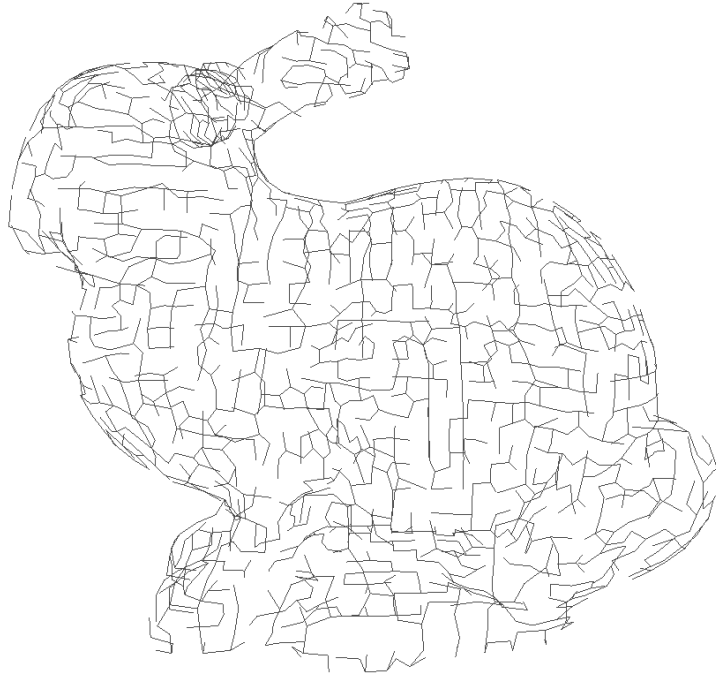
2.1.2 Sélection et synchronisation des zones d'insertion

Dans cette section nous présentons comment sont sélectionnées et synchronisées les zones d'insertion. La synchronisation est une étape importante car elle détermine le sens de lecture et d'écriture du message. Dans cette méthode, la synchronisation des données cachées est obtenue en repérant des connexités particulières présentes dans l'ACM. Une fois l'ACM construit, deux phases sont nécessaires afin de synchroniser le message à insérer. La première phase consiste à définir le sens de lecture de l'ACM. En effet, l'arbre est unique mais le parcours de celui-ci dépend du sommet de départ. Dans notre approche ce sommet est obtenu à partir d'une clef secrète. L'utilisation d'une clef nous apporte une sécurité sur le message inséré dans le modèle 3D. Le nombre de sens de lecture est égal au nombre de sommets dans le modèle 3D. Ainsi plus le nombre de sommets est grand plus le système est protégé¹. Une fois que le sens de lecture de l'ACM est obtenu, des zones particulières sont recherchées afin d'effectuer l'insertion de données. Ces zones sont formées de quatre sommets, il y a deux configurations possibles pour obtenir quatre sommets reliés par un noeud. La première configuration est composée du noeud en cours de traitement et de trois autres noeuds fils reliés chacun par une arête. Le quadrangle 1 de la Figure 2.5 illustre cette première configuration, le point entouré d'un cercle représente le noeud en cours de traitement. La seconde configuration est composée par le noeud en cours de traitement plus son noeud père et deux noeuds fils. Les quadrangles 2 et 3 de la Figure 2.5 illustrent cette seconde configuration. Nous cherchons dans le maillage de l'objet 3D les deux triangles inclus dans la zone formée par ces quatre noeuds. Les trois points de chacun de ces triangles doivent appartenir aux quatre noeuds de la zone. Deux triangles auront donc une arête commune dans la zone et forment un quadrangle. L'ensemble des quadrangles représentent donc les zones dans lesquelles peuvent être insérées les bits du message. Les Figures 2.6 illustrent un exemple de sélection de quadrangle sur une partie d'un maillage. La Figure 2.6.a représente l'ACM calculé sur la zone, la Figure 2.6.b représente les quadrangles sélectionnés pour être marqués et la Figure 2.6.c regroupe l'ACM et les quadrangles de la même zone. La méthode d'insertion utilisée, présentée section 2.1.3, utilise directement ces zones particulières détectées et synchronisées. Cependant, nous précisons section 2.1.4

¹La clef peut également servir de semence pour un GNPA afin de disperser le message dans l'objet 3D

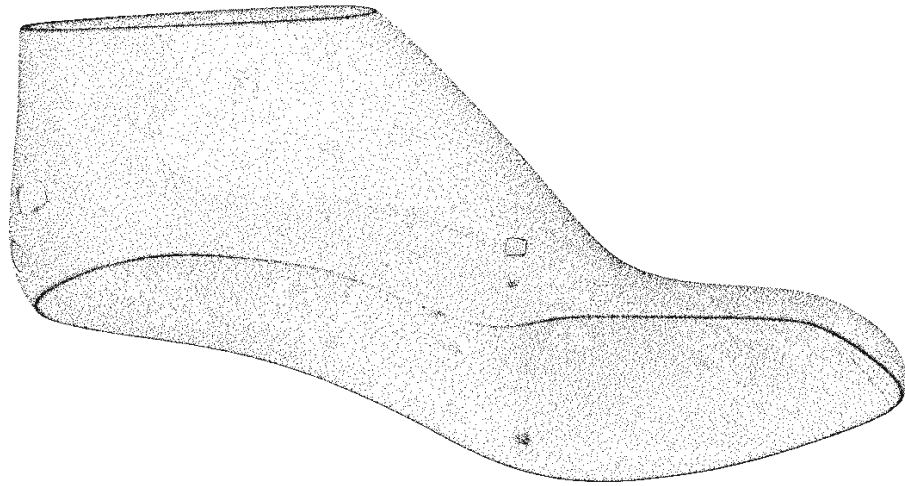


(a)

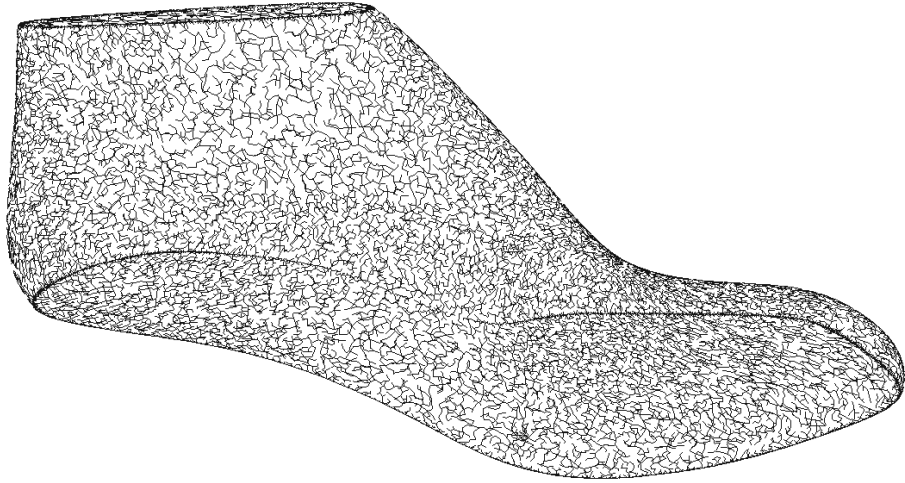


(b)

FIG. 2.3 – a) Nuage initial de points (453 points), b) Calcul de l'ACM avec l'algorithme de Prim.



(a)



(b)

FIG. 2.4 – a) Nuage de points initial (31088 points), b) Calcul de l'ACM avec l'algorithme de Prim.

qu'une partie de ces quadrangles ne peut pas être utilisée pour réaliser l'insertion. En effet, certaines zones ne répondent pas aux contraintes demandées par la méthode d'insertion et d'autres ne peuvent pas être retenues pour des raisons de non invisibilité de l'insertion. Les contraintes utilisées pour la sélection des zones sont présentées dans la section 2.1.4 de ce chapitre. L'ACM, de par sa construction, va nous permettre de résister aux transformations affines telles que les rotations, les translations ou les changements d'échelles. Ceci est rendu possible grâce à notre méthode d'insertion qui ne modifie pas la position des sommets de l'objet 3D. Le nombre de zones sélectionnées dépend du nombre de points de l'objet 3D, des valeurs des seuils pour les différentes contraintes mais également du maillage global de l'objet. Nous montrons, section 2.1.6, combien de zones en moyenne sont sélectionnées en fonction de tous ces paramètres.

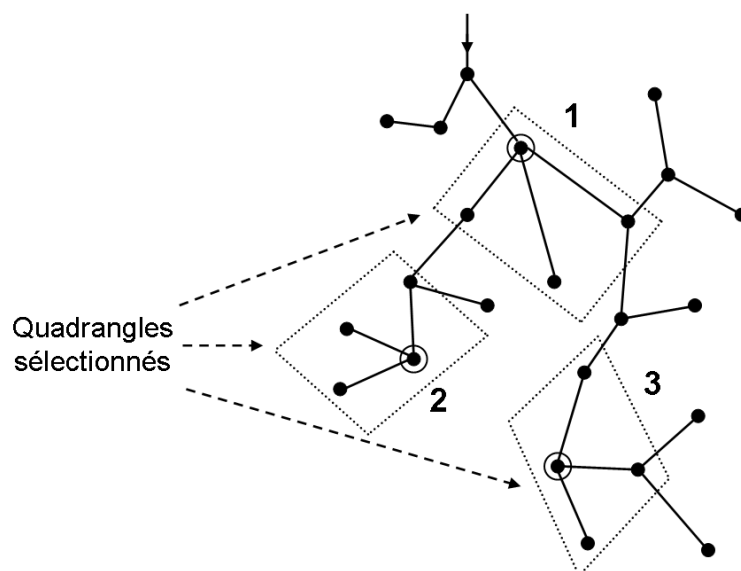


FIG. 2.5 – Exemple de zones formant des quadrangles sélectionnées pour la synchronisation des données cachées.

2.1.3 Insertion des données

Cette section présente la phase d'insertion des données cachées. Dans la section 2.1.2 nous avons présenté comment localiser les zones d'insertion à l'aide de l'ACM. Ces zones sont formées de quatre sommets, un nœud index et trois autres nœuds reliés au nœud index par une arête du graphe. Ces zones constituent donc des quadrangles. Pour insérer un bit du message dans un quadrangle sélectionné nous examinons l'arête commune des deux triangles inclus dans le quadrangle et nous la comparons à l'arête de l'ACM dans le quadrangle.

Une zone sélectionnée pour l'insertion est présentée Figure 2.7.a, elle est composée d'un nœud avec trois arêtes. L'insertion d'un bit à 0 est réalisée en construisant

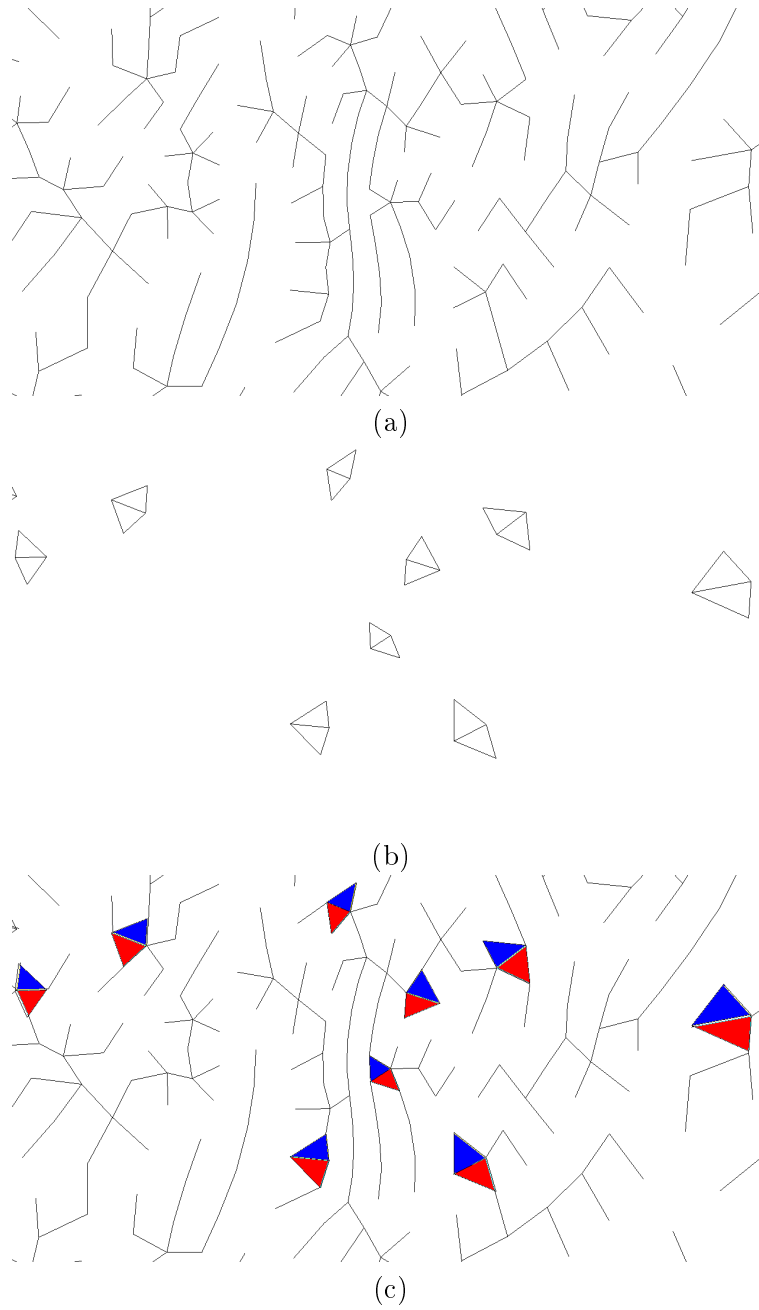


FIG. 2.6 – a) Zoom d'une zone de l'ACM, b) Zoom de la même zone avec affichage des quadrangles détectés, c) Zone avec l'ACM et les quadrangles.

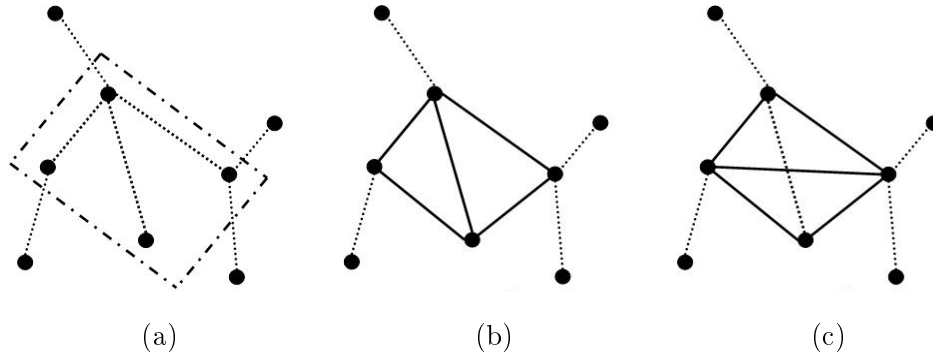
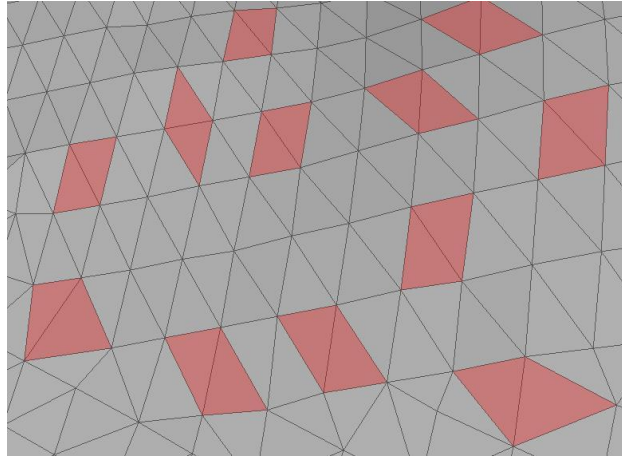


FIG. 2.7 – a) Partie de graphe issu de l’ACM et sélection d’un quadrangle, b) Insertion d’un bit à 0, c) Insertion d’un bit à 1.

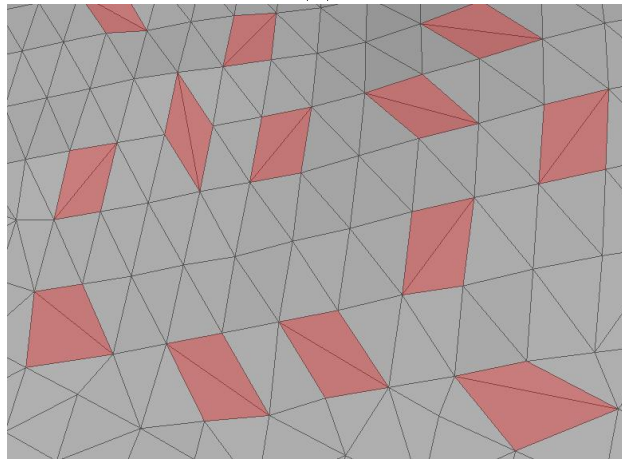
l’arête commune des deux triangles sur l’arête initiale de l’ACM comme présenté Figure 2.7.b. Au contraire pour l’insertion d’un bit à 1, l’arête commune des deux triangles est construite de façon à ne pas être en superposition avec l’arête initiale de l’ACM comme présenté Figure 2.7.c. Notons que la modification a lieu dans la connexité du maillage et non dans celle de l’ACM. Afin d’illustrer le résultat d’une insertion dans un maillage, nous avons effectué, Figure 2.8, un zoom sur une partie du maillage. La Figure 2.8.a montre un maillage avant insertion, la Figure 2.8.b montre le même maillage où l’ensemble des bases communes des triangles composant les quadrangles retenus pour l’insertion a été inversé. Si nous considérons que les quadrangles retenus pour insérer les bits du message sont convexes et coplanaires, alors le changement de connexité effectué lors du marquage de ces quadrangles ne va pas modifier la surface du modèle 3D. Cette méthode d’insertion permet de ne pas modifier la position des sommets du modèle 3D. Ce point est une notion importante pour la synchronisation et nous permet de reconstruire le même ACM lors de l’extraction du message. Par contre, cette méthode d’insertion impose des contraintes sur les quadrangles choisis. Modifier la connexité du maillage peut amener des erreurs au niveau de celui-ci mais aussi des défauts visibles au niveau de la surface. Nous détaillons section 2.1.4 les contraintes à respecter et expliquons pourquoi certains quadrangles ne peuvent pas être utilisés pour insérer les données.

2.1.4 Contraintes sur le choix des zones d’insertion

Dans cette section nous présentons les contraintes appliquées aux quadrangles résultant de l’étape de synchronisation. En effet, une partie de ces quadrangles n’est pas utilisée pour effectuer l’insertion de données. Ces contraintes concernent la coplanarité, la convexité et le recouvrement.



(a)



(b)

FIG. 2.8 – a) Zoom d’une partie du maillage avant insertion, b) Zoom de la même partie du maillage après une inversion de toutes les bases communes des triangles composant les quadrangles retenus.

2.1.4.1 Contrainte de coplanarité

La première contrainte est la coplanarité des quadrangles. Le fait de modifier la connectivité des deux triangles formant un quadrangle modifie aussi l’angle formé entre ces deux triangles. Par conséquent, l’insertion de données sur un quadrangle non coplanaire affecte la surface et donc le rendu visuel du modèle 3D. De manière idéale il ne faudrait insérer le message que dans les quadrangles strictement coplanaires. Cependant, la quantité de quadrangles répondant strictement au critère de coplanarité est très limitée. Afin d’augmenter la capacité d’insertion, nous insérons dans notre approche un seuil S_c de tolérance sur la coplanarité des quadrangles sélectionnés. Ce seuil nous permet

d'obtenir un compromis entre la capacité d'insertion et la qualité du modèle 3D. Plus ce seuil sera grand, plus la capacité d'insertion sera grande au détriment du rendu visuel. Au contraire plus ce seuil sera petit, plus la capacité d'insertion sera petite mais moins l'objet 3D sera dégradé. Par l'intermédiaire du seuil S_c , un réglage est donc possible entre la capacité d'insertion et le rendu visuel du modèle 3D. Soit le quadrangle Q_{1234} formé des points P_1, P_2, P_3, P_4 . Dans un premier temps, la normale N_1 au triangle T_{123} et la normale N_2 au triangle T_{234} sont calculées. L'angle A_1 entre les normales N_1 et N_2 est alors calculé. La base commune entre les deux triangles est ensuite inversée afin de simuler l'insertion d'un bit sur le quadrangle. Les normales N_3 et N_4 respectivement des nouveaux triangles T_{134} et T_{124} sont calculées ainsi que l'angle A_2 entre ces normales. L'angle maximum entre les triangles des deux topologies possibles du quadrangle est donc comparé avec le seuil S_c . Le quadrangle ne sera retenu que si le plus grand des angles calculés est inférieur au seuil S_c préalablement fixé :

$$Q_{1234} \text{ est retenu si et seulement si } \max(A_1, A_2) < S_c. \quad (2.1)$$

Un exemple de calcul de A_1 et A_2 pour la coplanarité d'un quadrangle est illustré Figure 2.9.

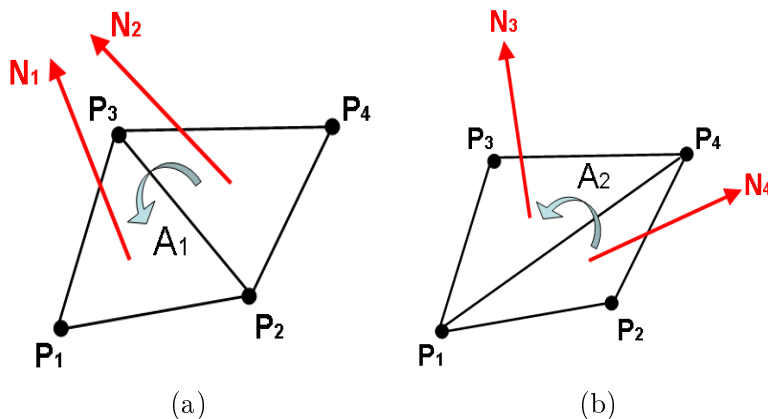


FIG. 2.9 – a) Calcul de l'angle A_1 entre les normales N_1 et N_2 , b) Calcul de l'angle A_2 entre les normales N_3 et N_4 après le changement de la base commune des triangles.

2.1.4.2 Contrainte de convexité

La seconde contrainte impose que les quadrangles utilisés pour la dissimulation de données soient convexes. Pour cette contrainte nous partons du principe que les quadrangles retenus répondent déjà à la contrainte de coplanarité. La Figure 2.7 illustre un quadrangle convexe où un bit à 0 et à 1 ont été insérés respectivement Figures 2.7.b et 2.7.c. Dans ce cas, malgré le changement de connexité des triangles, le quadrangle répond à des caractéristiques identiques et couvre le même espace géométrique pour les deux cas d'insertion. La Figure 2.10 illustre un cas de quadrangle non convexe formé par

les plans P_{123} et P_{234} . Nous constatons que la modification de la connexité des triangles lors de l'insertion d'un bit modifie la surface couverte par le précédent quadrangle. Cette modification ajoute une erreur sur la surface du quadrangle. Cette erreur est représentée par la surface P_{134} de la Figure 2.10. Cette contrainte de convexité a été introduite afin d'éviter cette erreur sur la surface.

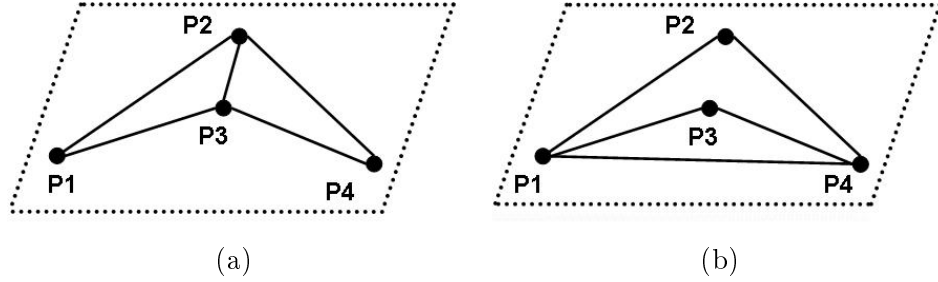


FIG. 2.10 – a) Triangles T_{123} et T_{234} avant insertion, b) Triangles T_{124} et T_{134} après insertion.

Le calcul de cette contrainte combine successivement deux procédés :

- Les vecteurs $V_{i,i+1 \bmod 4}$ entre les points P_i et P_{i+1} du quadrangle sont calculés pour $i \in \{1, \dots, 4\}$. Les angles α_i entre deux vecteurs consécutifs sont alors calculés.

$$Q_{1234} \text{ est retenu si et seulement si } \alpha_i < 180^\circ \text{ pour } i \in \{1, \dots, 4\}. \quad (2.2)$$

Ceci permet de retirer tous les quadrangles ayant des angles obtus ou trois points alignés.

- Le second calcul nous permet de supprimer des quadrangles trop proches d'une forme triangulaire, ce qui correspond à trois points sur les quatre alignés. Dans ce cas, l'insertion de données ferait apparaître des triangles trop disproportionnés. Un seuil de tolérance S_t est choisi afin que la proportion des deux triangles d'un quadrangle respecte une certaine valeur. Pour cela nous calculons la longueur des segments $\overline{P_{23}}$ et $\overline{P_{14}}$ ainsi que la distance D séparant les centres de ces deux segments. La Figure 2.11 illustre ce calcul. Un quadrangle est alors retenu pour l'insertion si et seulement si :

$$D \leq S_t \times \overline{P_{14}} \text{ et } D \leq S_t \times \overline{P_{23}}. \quad (2.3)$$

2.1.4.3 Contrainte de recouvrement

La troisième contrainte concerne le recouvrement des quadrangles. A partir des quadrangles retenus avec les deux contraintes précédentes il peut en rester avec plusieurs sommets en commun. Lorsque des quadrangles possèdent au maximum un point en commun cela ne pose aucun problème et dans ce cas les quadrangles sont retenus pour l'insertion des données cachées. Par contre si deux quadrangles possèdent plus de un point en commun, la modification de la connexité sur un de ces quadrangles au moment

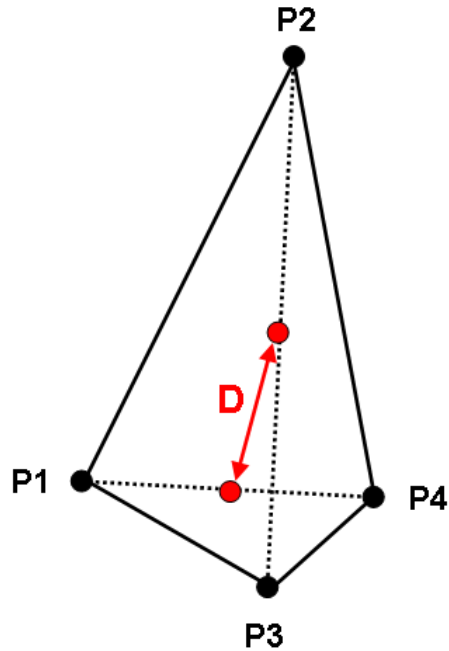


FIG. 2.11 – Exemple de calcul de la distance D pour la contrainte de convexité.

de l'insertion de données, va perturber le second. C'est le cas par exemple des noeuds possédant plus de trois fils. Pour éviter ce problème de recouvrement un choix sera fait parmi l'ensemble des quadrangles se recouvrant pour n'en garder qu'un seul. Ce choix est fait de façon à garder le quadrangle qui affectera le moins le rendu visuel du modèle 3D lors de l'insertion d'un bit du message. Par conséquent le quadrangle le plus coplanaire sera choisi pour l'insertion des données. Finalement nous retenons uniquement les quadrangles satisfaisant les trois contraintes présentées. La méthode d'insertion présentée section 2.1.3 est alors appliquée sur les quadrangles retenus. Cette contrainte limite le nombre maximum théorique de quadrangles marquables à $N/4$, N étant le nombre de point de l'objet 3D.

2.1.5 Extraction du message

Pour extraire le message caché, la première étape consiste à reconstruire l'ACM à partir des points du modèle. Pour cela, l'ACP est donc calculée sur les points afin de déterminer un repère sur l'objet qui sera utilisé pour définir le point de départ de l'ACM à l'aide de la clef secrète. Comme notre méthode d'insertion ne modifie pas la position des points, l'ACM reconstruit est le même qu'à l'insertion. Dans la seconde étape il s'agit de retrouver les zones d'insertion, en utilisant les mêmes contraintes que pour l'insertion. Une fois ces deux étapes réalisées, il ne reste plus qu'à extraire le message de ces zones. Pour cela nous comparons la position de l'arête commune des deux triangles

formant un quadrangle avec l'arête initiale de l'ACM. Si l'arête commune fait partie de l'ACM alors le bit lu est un 0, sinon c'est un 1 comme illustré Figure 2.7. Notons que le parcours de l'ACM nécessite l'utilisation d'une clef secrète protégeant l'information cachée. La Figure 2.12 illustre le schéma d'extraction du message. L'ACM de l'objet est unique mais les quadrangles sélectionnés pour l'insertion dépendent eux du sens de lecture de l'ACM. Si N est le nombre de point de l'objet 3D, le nombre de possibilité de message différent vis à vis de la clef est pour cette méthode de N . Afin d'augmenter la complexité de la méthode, la clef peut être utilisée pour mélanger l'ordre des bits du message. Le nombre de message possible est alors de $N \times 2^n$, avec $n \leq N$ où n représente le nombre de quadrangles utilisés pour l'insertion des données cachées.

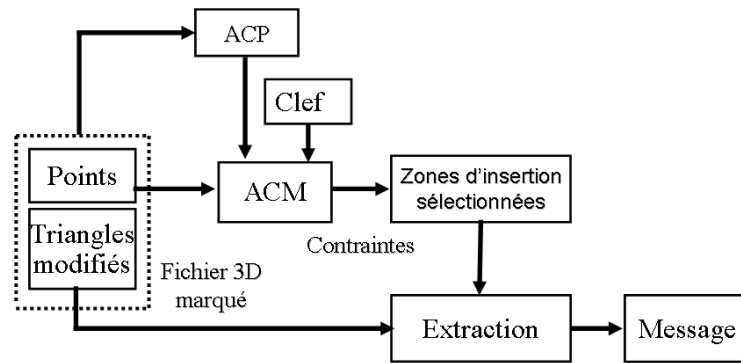














FIG. 2.12 – Présentation générale de la méthode d'extraction.

2.1.6 Résultats

Dans cette section nous avons appliqué et analysé la méthode d'insertion proposée sur douze objets 3D ayant un nombre de points et des caractéristiques différentes. Le Tableau 2.1 indique les caractéristiques des objets 3D utilisés.

2.1.6.1 Exemple de sélection de quadrangles

Nous illustrons Figures 2.13 et 2.14 nos résultats de recherche de quadrangles sur deux modèles 3D différents. Les Figures 2.13.a et 2.14.a représentent les maillages originaux des objets 3D. Les Figures 2.13.b et 2.14.b illustrent les quadrangles retenus avec la méthode basée sur l'ACM. Sur ces deux exemples nous remarquons que les quadrangles retenus sur les deux objets 3D sont répartis de façon homogène sur toute la surface. Cette répartition homogène est un avantage dans la mesure où cela permet de diffuser l'erreur engendrée par le tatouage sur toute la surface.

Objets 3D	bunny 1	bunny 2	bunny 3	dragon 1
Nombre de points	453	1887	8146	5203
Nombre de triangles	948	3851	16301	11102
				
Objets 3D	dragon 2	happy 1	happy 2	chaussure homme
Nombre de points	22982	7102	32316	12606
Nombre de triangles	47794	15536	67240	25208
				
Objets 3D	dragon chinois	chaussure femme	horse	julius
Nombre de points	20184	31088	43039	48485
Nombre de triangles	40364	62168	85145	96966
				

TAB. 2.1 – Caractéristiques des objets 3D utilisés.

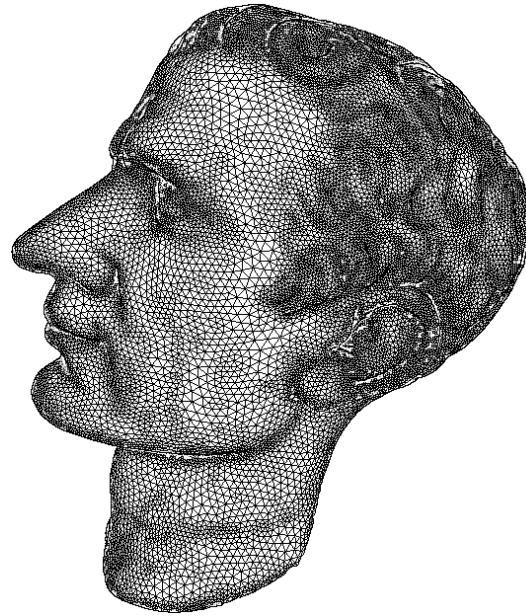


(a)



(b)

FIG. 2.13 – a) Maillage triangulé de la chaussure (31088 points, 62168 triangles), b) Visualisation des quadrangles retenus (148 quadrangles) pour un seuil de coplanarité S_c de 20° .



(a)



(b)

FIG. 2.14 – a) Maillage triangulé du visage (43039 points, 85145 triangles), b) Visualisation des quadrangles retenus (3313 quadrangles) pour un seuil de coplanarité S_c de 20° .

2.1.6.2 Influence du seuil de coplanarité

Le seuil de coplanarité est un argument important dans la sélection des quadrangles. En effet, ce seuil détermine la limite maximum de l'angle entre les faces des deux triangles qui composent un quadrangle. Si l'angle entre les deux triangles est supérieur à cet angle maximum, le quadrangle n'est pas sélectionné pour l'insertion. En augmentant la valeur du seuil de coplanarité la méthode prend en compte des angles plus grands entre les deux triangles d'un quadrangle. De ce fait le nombre de quadrangles retenus par la méthode augmente. En contrepartie les déformations sur la surface de l'objet augmentent également. A l'inverse une diminution du seuil réduit le nombre de quadrangles retenus par la méthode et diminue les déformations sur la surface. Globalement, du fait de la conservation des positions initiales des sommets, la qualité visuelle des objets 3D marqués est très bonne. Les déformations visuelles proviennent surtout de la variation d'éclairage du triangle à cause du changement d'orientation de la normale. Dans le cas d'utilisation de texture plaquée sur la surface, la distorsion due à l'orientation de la normale est moins visible.

Afin d'évaluer la méthode, le premier critère utilisé, calculé en bit par sommet, est la capacité d'insertion. Les courbes de la Figure 2.15 illustrent la capacité d'insertion de la méthode proposée en fonction des modèles 3D présentés dans le Tableau 2.1, et cela pour plusieurs valeurs du seuil de coplanarité S_c . L'axe des abscisses représente le type d'objet 3D utilisé, globalement des plus petits aux plus grands, et l'axe des ordonnées indique la capacité d'insertion de la méthode en pourcentage. Globalement la capacité d'insertion augmente légèrement avec la taille de l'objet 3D. Plus l'objet 3D est grand et plus il y a de quadrangles potentiels à marquer.

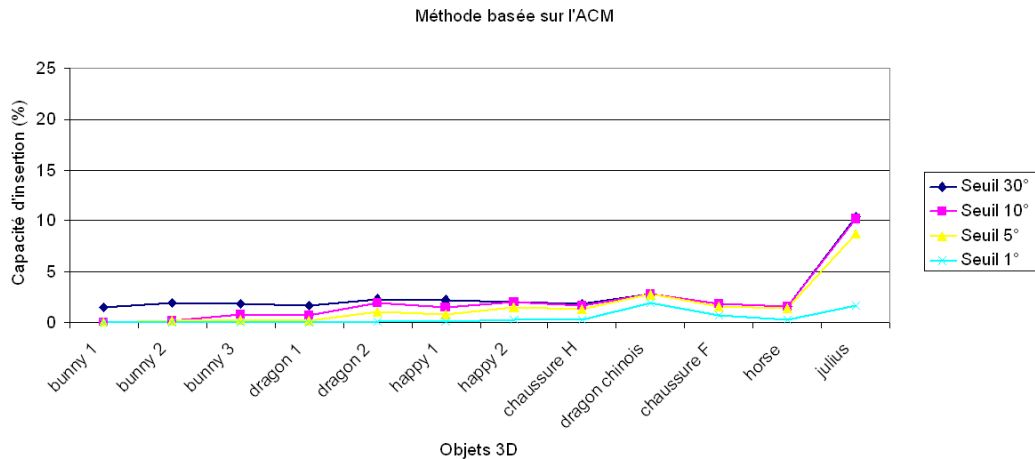


FIG. 2.15 – Influence du taux d'insertion sur la capacité avec la méthode basée sur l'ACM.

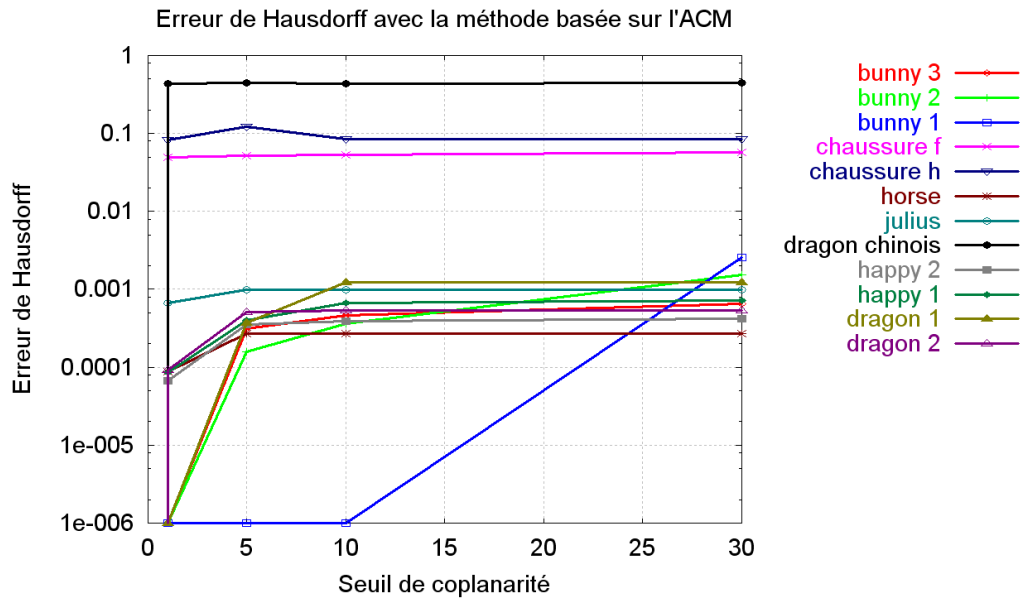
2.1.6.3 Mesure d'erreur

Le second critère d'analyse consiste à évaluer l'erreur faite sur la surface en fonction du seuil de coplanarité S_c et donc du nombre de bits dissimulés. Comme précisé précédemment, le fait d'augmenter ce seuil nous permet d'augmenter la capacité d'insertion, mais ceci est fait au détriment de la qualité visuelle de la surface. Un calcul est effectué afin de quantifier l'erreur faite au niveau de la surface marquée par rapport à la surface de l'objet original. La méthode standard pour le calcul d'erreur est la distance géométrique de Hausdorff décrite dans les équations 1.12 et 1.15 du chapitre 1 de la première partie. Pour effectuer le calcul d'erreur à partir de la distance géométrique de Hausdorff, nous avons utilisé l'algorithme proposé par le logiciel Metro [CRS98]. Cette métrique de distorsion ne permet pas de définir un seuil limite d'imperceptibilité pour l'insertion. Nous ne disposons pas d'outil permettant une comparaison fiable entre deux objets. La mesure de distorsion calculée pour différents seuils de coplanarité ne nous permettra que de mesurer l'influence de ce paramètre sur la distorsion de l'objet.

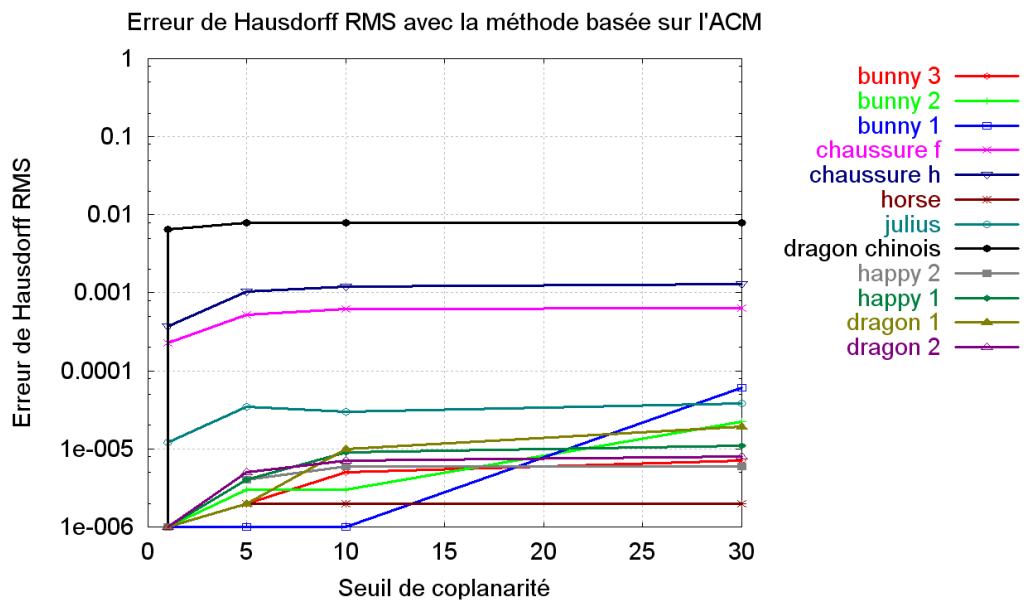
Les Figures 2.16.a et 2.16.b illustrent les valeurs des erreurs commises sur les surfaces en fonction du seuil de coplanarité S_c utilisé pour effectuer l'insertion de données cachées. Ce calcul d'erreur a été appliqué aux différents modèles 3D. L'axe des abscisses représente le seuil de coplanarité S_c utilisé et l'axe des ordonnées représente l'erreur calculée sur la surface du modèle 3D. la Figure 2.16.a illustre les erreurs obtenues avec la méthode de Hausdorff MAX et la Figure 2.16.b illustre les erreurs obtenues avec la méthode de Hausdorff RMS. Dans tous les cas, nous constatons que, globalement, l'erreur augmente quand la valeur du seuil S_c augmente. Nous constatons également que l'erreur est différente en fonction des objets marqués et qu'elle est bien plus importante pour les trois objets *chaussure homme*, *chaussure femme* et *dragon chinois*. Concernant les deux formes de chaussures, cela vient du fait que les formes initiales de ces objets sont composées de triangles fortement désorganisés comparés aux autres objets testés. Concernant le *dragon chinois*, c'est l'objet le plus complexe que nous avons testé dans le sens qu'il comporte de nombreuses courbures fortes proches de zones relativement planes qui ont été marquées.

2.1.6.4 Robustesse

Le troisième critère permet d'évaluer la résistance au bruit de la méthode. Notons que cette méthode n'a pas été développée pour être robuste au bruit. La Figure 2.17 représente la résistance de la méthode à l'ajout de bruit sur les sommets de l'objet 3D. L'axe des abscisses représente l'amplitude du bruit ajouté aux sommets de l'objet et l'axe des ordonnées représente le pourcentage de quadrangles corrects détectés. Avec une faible amplitude de bruit la méthode conserve 100% des quadrangles marqués. Par contre si l'amplitude du bruit augmente alors le nombre de quadrangles corrects détectés diminue assez rapidement dans l'ensemble sauf pour trois objets qui sont plus robustes au bruit. Il se trouve que ces trois objets sont ceux qui ont subi le plus de distorsions au moment de l'insertion. Tous les autres objets, étant plus lisses ou ayant des triangles mieux organisés (de tailles homogènes ou de même valence), ont été plus rapidement perturbés par un ajout de bruit avant l'extraction.



(a)



(b)

FIG. 2.16 – Pour la méthode basée sur l'ACM, en fonction du seuil S_c , erreurs calculées par : a) La méthode de Hausdorff Max, b) La méthode de Hausdorff RMS.

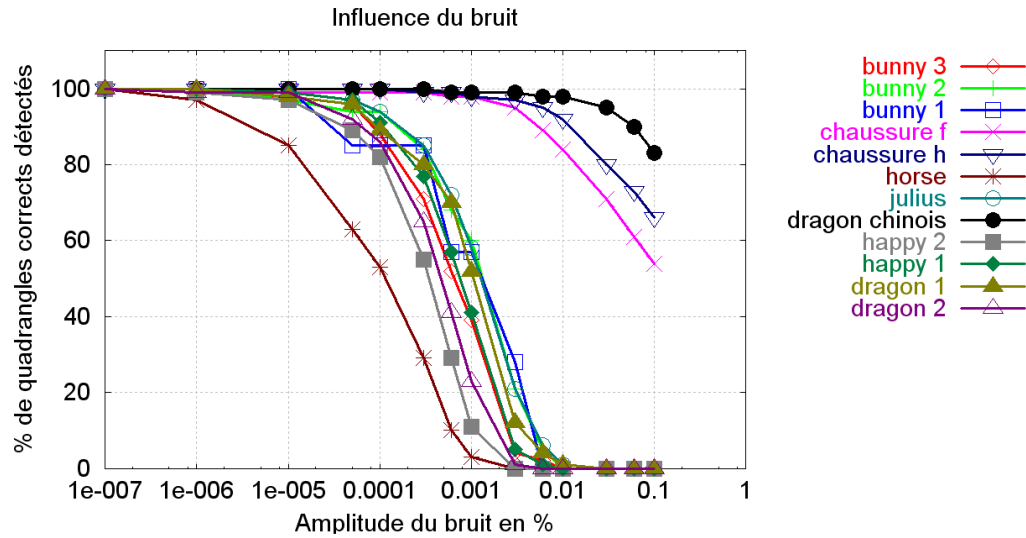


FIG. 2.17 – Influence du bruit sur la détection des quadrangles avec la méthode basée sur l’ACM.

2.1.6.5 Fiabilité

Afin d’analyser la sécurité et non plus la robustesse de la méthode, en plus de la complexité d’extraction du message augmentée du fait de l’utilisation d’une clef, nous avons effectué une analyse ROC (*Receiver Operating Characteristic*)[Ega75]. Les courbes ROC présentées Figure 2.18 permettent d’illustrer la sensibilité et la spécificité de nos méthodes en calculant les faux positifs ainsi que les faux négatifs au moment de l’extraction. Les faux négatifs représentent les quadrangles marqués mais non récupérés. Les faux positifs représentent les quadrangles récupérés mais qui n’étaient pas marqués. A l’extraction, pour un bruit donné, nous avons fait varier le seuil d’extraction S_c . Les résultats obtenus pour cette méthode sont illustrés Figure 2.18, en dessous du seuil d’extraction utilisé pour l’insertion, nous constatons que notre méthode ne détecte pas de faux positifs ($1\text{-spécificité} = 0$). Cela vient du fait que nous récupérons moins de quadrangles mais qu’ils ont tous été marqués au préalable. Avec un seuil d’extraction plus grand, la plupart des faux négatifs, apparus à cause du bruit, disparaissent ($\text{sensibilité} \simeq 1$). Cela vient du fait qu’il y a plus de quadrangles récupérés, donc potentiellement plus de quadrangles marqués sont récupérés malgré le bruit. Il y a donc une augmentation des faux positifs.

2.1.7 Conclusion

Dans cette partie nous avons présenté une méthode d’insertion de données cachées dans des objets 3D. Cette méthode s’appuie sur un arbre couvrant minimum afin de

sélectionner et de synchroniser les zones où sera effectuée l'insertion de données. L'insertion est faite dans la topologie du maillage dans les zones sélectionnées. L'avantage de cette méthode est qu'elle ne modifie pas la position des sommets des objets 3D afin de réaliser l'insertion de données. La partie résultat a montré que cette méthode était fragile. Elle résiste comme voulu aux transformations affines mais ne résiste pas aux autres attaques potentielles. Les inconvénients de cette méthode sont principalement la faible capacité d'insertion et la complexité. Le faible taux d'insertion vient du fait que l'ACM présente peu de nœuds dont la topologie correspond aux connexités particulières demandées pour valider un quadrangle. La complexité est assez importante à cause du calcul du graphe de voisinage et de l'ACM. Pour qu'un algorithme soit utilisable dans un contexte industriel il faut que le temps d'exécution du tatouage d'un objet de 100.000 points dure moins de 6 secondes sur une machine standard. Cette section a fait l'objet des publications [APDP08a](soumise) et [APDP08b, APDP08c].

2.2 Méthode d'insertion basée sur la projection

Cette seconde méthode d'insertion de données cachées est basée sur la projection des centres des zones d'insertion sur un axe clef. Comme dans la méthode présentée section 2.1, les zones d'insertion sont également des quadrangles. Cette méthode est composée de trois parties. La première partie est la sélection des zones qui vont nous servir à insérer des données cachées. Ces zones sont choisies selon plusieurs contraintes. La seconde partie est la synchronisation du message avec le modèle 3D. Pour cela nous nous appuyons sur un axe clef construit dans un repère invariant. Ce repère est construit à l'aide d'une analyse en composante principale (ACP) et d'un axe généré à partir d'une clef secrète. Le centre de chaque quadrangle choisi pour l'insertion est alors projeté sur l'axe. La troisième étape est l'insertion du message. Pour cela, comme dans la méthode précédente, la connexité des triangles des quadrangles sélectionnés est modifiée. La Figure 2.19 illustre le schéma général de la méthode. Dans la section 2.2.1 nous présentons les contraintes supplémentaires utilisées pour sélectionner les zones où sera inséré le message. Nous détaillons dans la section 2.2.2 comment synchroniser ces zones avec le modèle 3D. La section 2.2.3 présente la méthode utilisée pour insérer le message dans le maillage 3D. Nous montrons section 2.2.4 comment extraire le message d'un fichier 3D marqué avec cette seconde méthode. Enfin nous présentons les résultats obtenus avec cette méthode dans la section 2.2.5.

2.2.1 Sélection des zones d'insertions

Comme défini section 2.1.2 nous appelons quadrangle une zone formée par deux triangles du maillage ayant une arête commune. Ces quadrangles sont validés comme zones d'insertion dans la mesure où ils répondent à toutes les contraintes. Contrairement à la méthode précédente où les quadrangles étaient choisis par une connexité particulière de l'ACM, ici ce sont uniquement ces contraintes qui nous permettent de faire cette sélection. En fait dans cette seconde méthode, tous les quadrangles du maillage sont

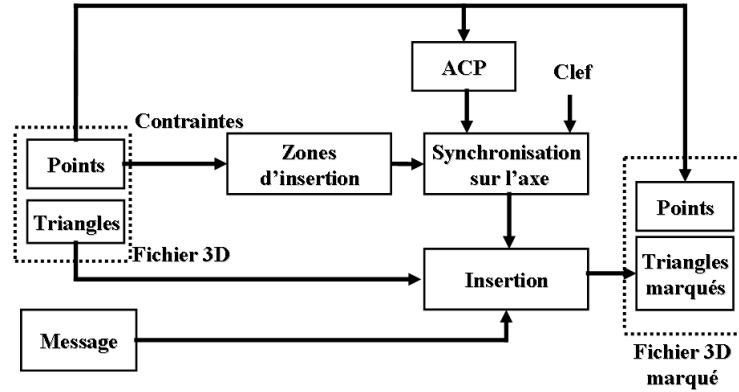


FIG. 2.19 – Présentation générale de la méthode d'insertion basée sur la projection des quadrangles.

examinés afin de voir si ils répondent aux critères de convexité, coplanarité et recouvrement. Les trois critères de convexité, coplanarité et recouvrement sont les mêmes que dans la méthode précédente détaillée section 2.1.4. Un quatrième critère est nécessaire pour cette méthode afin de sélectionner les quadrangles. Il s'agit de la contrainte de stabilité.

Stabilité

C'est une contrainte forte pour l'insertion de données basée sur la projection des quadrangles. En effet, le fait de modifier la connexité des triangles pour l'insertion de données engendre de nouveaux triangles et donc de nouveaux quadrangles. Ces nouveaux quadrangles sont susceptibles de répondre aux contraintes demandées pour l'insertion et donc de venir interférer avec les quadrangles choisis au préalable. Nous pouvons voir Figure 2.20 un exemple d'interférence. Au départ dans la Figure 2.20.a le quadrangle Q_{1234} choisi pour l'insertion est représenté par les triangles T_{124} et T_{234} . Nous remarquons que les triangles T_{234} et T_{235} forment également le quadrangle Q_{2534} qui ne répond pas au critère de convexité. La Figure 2.20.b représente la même zone après une insertion sur le quadrangle Q_{1234} avec changement de base commune. Nous constatons alors qu'il est possible de former le quadrangle Q_{1253} avec les triangles T_{123} et T_{253} qui répond aux critères de sélection. Ce quadrangle peut alors interférer avec le quadrangle précédemment sélectionné et nous empêcher de récupérer le bit du message. En fait l'insertion d'un bit du message dans un quadrangle peut générer un nouveau quadrangle répondant aux quatre contraintes. Dans ce cas, des ambiguïtés seraient rencontrées au moment de l'extraction. Pour qu'un quadrangle réponde au critère de stabilité il faut que tous les quadrangles formés lors de l'insertion d'un bit ne puissent pas interférer avec le quadrangle sélectionné pour l'insertion. Les quadrangles sont évalués à l'aide des critères de coplanarité et de convexité, nous choisirons alors pour l'insertion de données

le quadrangle ayant les meilleurs critères dans la zone de perturbation. De cette façon nous nous assurons que le quadrangle est stable.

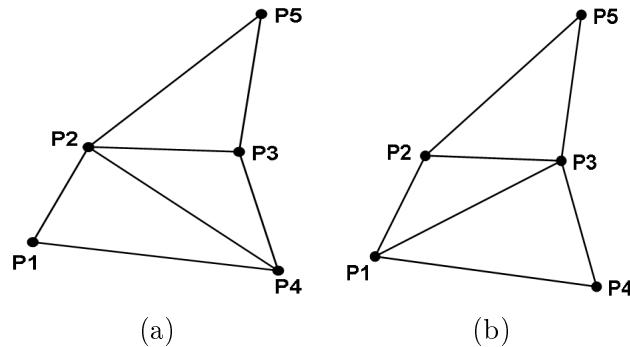


FIG. 2.20 – a) Triangles initiaux, b) Triangles après insertion.

2.2.2 Synchronisation des quadrangles retenus

Pour réaliser la synchronisation nous nous appuyons sur un axe clef. Cet axe est généré à partir d'une clef en construisant un point et un vecteur. Cet axe est construit dans le repère de l'objet obtenu à partir d'une analyse en composante principale (ACP). L'ACP nous permet de rendre notre méthode d'insertion robuste aux transformations affines telles que les rotations, les translations ou les changements d'échelles. Pour synchroniser le message nous effectuons une projection orthogonale des centres des quadrangles retenus sur cet axe. Nous classons alors les points projetés en prenant le point initial de l'axe clef comme origine. Dans le cas où plusieurs quadrangles se projettent sur l'axe clef en un même point le quadrangle le plus proche de l'axe clef est sélectionné en premier. Par conséquent notre approche est robuste à une réorganisation des points dans le fichier 3D. L'ordonnancement de ces points sur l'axe donnera le sens d'insertion des bits du message sur les quadrangles. La sécurité du message repose sur l'axe clef mais aussi sur la taille de l'objet 3D à tatouer. Il est possible de retrouver le message en essayant toutes les permutations possibles des quadrangles servant à l'insertion des données cachées. L'information cachée peut être soit un 0 soit un 1 ce qui fait deux possibilités par quadrangle. Soit $n \leq N$, le nombre de quadrangles utilisés pour insérer l'information cachée, alors le nombre de permutations possibles des bits du message est le nombre de possibilités à la puissance du nombre de quadrangles : 2^n . La sécurité du message augmente donc avec le nombre de quadrangles utilisés pour l'insertion. La Figure 2.21 illustre la projection et la synchronisation de cinq quadrangles sur l'axe clef dans le repère de l'ACP de l'objet 3D.

2.2.3 Insertion du message

Comme pour la synchronisation, l'insertion va également s'appuyer sur l'axe clef. Pour chaque quadrangle retenu nous projetons sur l'axe clef les quatre points formant

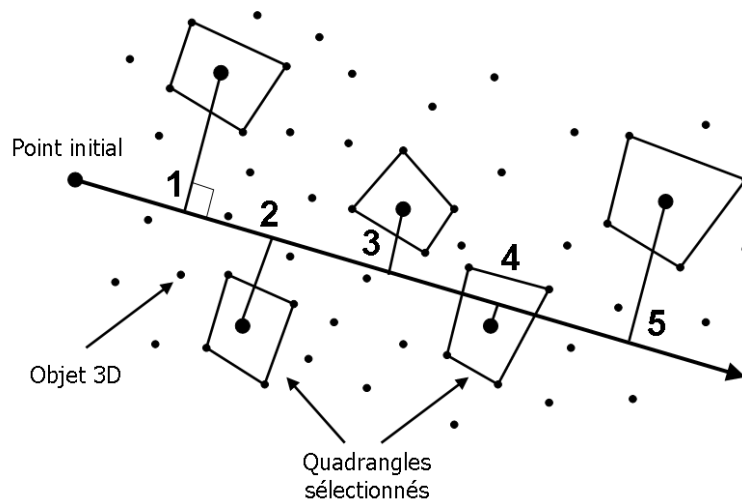


FIG. 2.21 – Synchronisation des projections des centres des quadrangles sur l’axe clef.

ce quadrangle. Deux de ces quatre points appartiennent à la base commune aux deux triangles formant le quadrangle. Le code b est attribué à la projection des points appartenant à la base commune et le code a est attribué à la projection des deux autres points du quadrangle. Le sens de lecture de l’axe clef va nous permettre d’obtenir un ordre particulier sur les projections des points. Nous considérons que si un code b est lu en premier sur l’axe clef alors le quadrangle contient un bit à 1 du message caché. Respectivement si un code a est lu en premier alors c’est un bit à 0 qui est caché. Pour changer la valeur du bit caché il suffit de changer la base commune aux deux triangles formant le quadrangle. La Figure 2.22 montre l’ensemble des solutions possibles pour réaliser une insertion ainsi que les codes correspondants. Les Figures 2.22.a montrent des quadrangles marqués à 0. Si nous souhaitons marquer ces quadrangles avec un bit à 1 il suffit d’inverser la base commune des deux triangles afin d’obtenir les configurations présentées Figures 2.22.b. Dans le cas particulier où un point de la base et un autre point du quadrangle se projettent en premier et au même endroit sur l’axe clef nous prenons alors en compte la distance séparant ces points de l’axe clef. Si le point le plus proche des deux est le point appartenant à la base commune alors le quadrangle est considéré comme porteur d’un bit à 1, sinon le quadrangle dissimule un bit à 0 comme présenté Figures 2.22.a3 et 2.22.b3.

2.2.4 Extraction du message

La première étape pour l’extraction du message est de rechercher les zones d’insertion répondant aux critères de convexité, coplanarité, stabilité et recouvrement. Ces zones sont ensuite synchronisées sur l’axe clef construit avec la clef et l’ACP réalisée sur l’objet 3D. Une fois les zones d’insertion synchronisées nous projetons les quatre points de chaque quadrangle retenu afin d’en extraire le code. Celui-ci va nous donner la

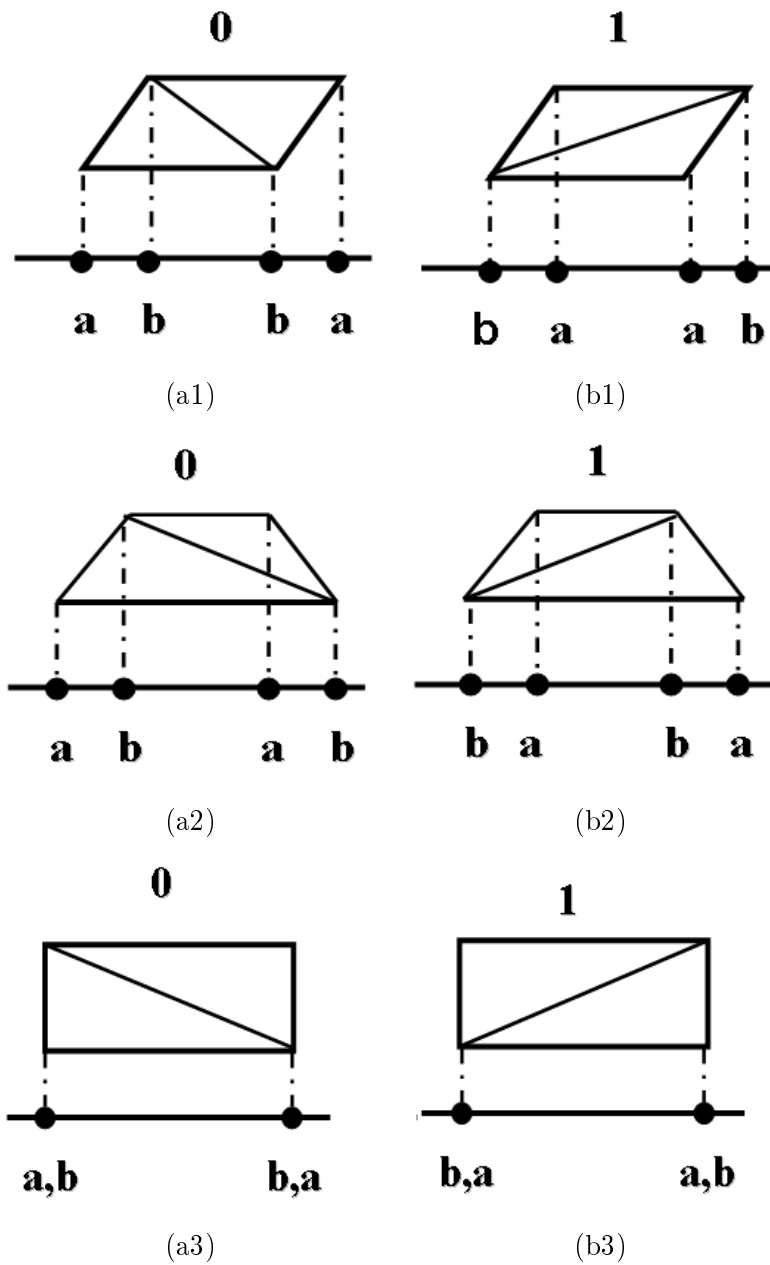


FIG. 2.22 – a1, a2, a3) Configuration permettant d’insérer un bit du message à 0, b1, b2, b3) Configuration permettant d’insérer un bit du message à 1.

valeur du bit inséré dans le quadrangle. La Figure 2.23 illustre le schéma d'extraction du message.

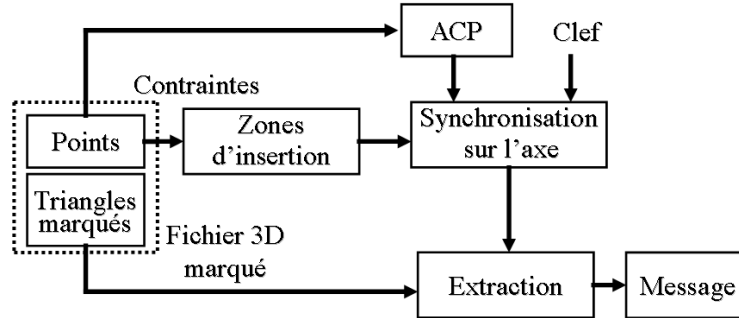


FIG. 2.23 – Présentation générale de la méthode d'extraction proposée.

2.2.5 Résultats

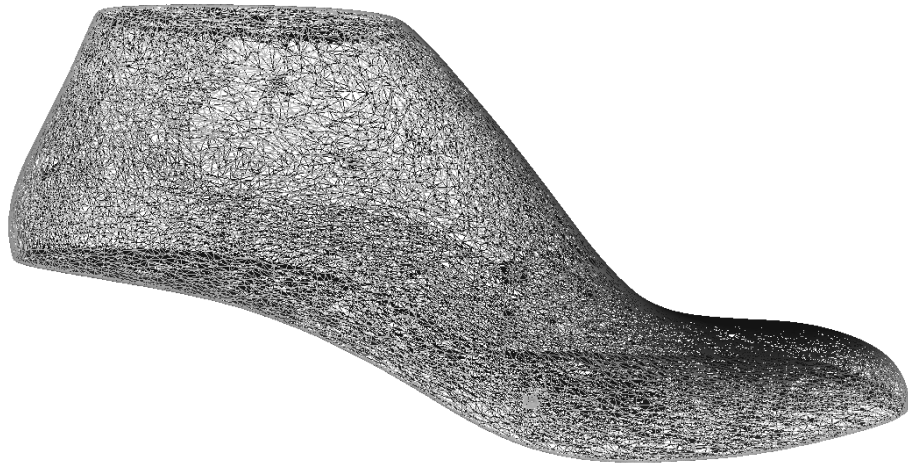
Dans cette section nous avons appliqué et analysé la méthode d'insertion proposée sur les douze objets 3D présentés dans le tableau 2.1.

2.2.5.1 Exemple de sélection de quadrangles

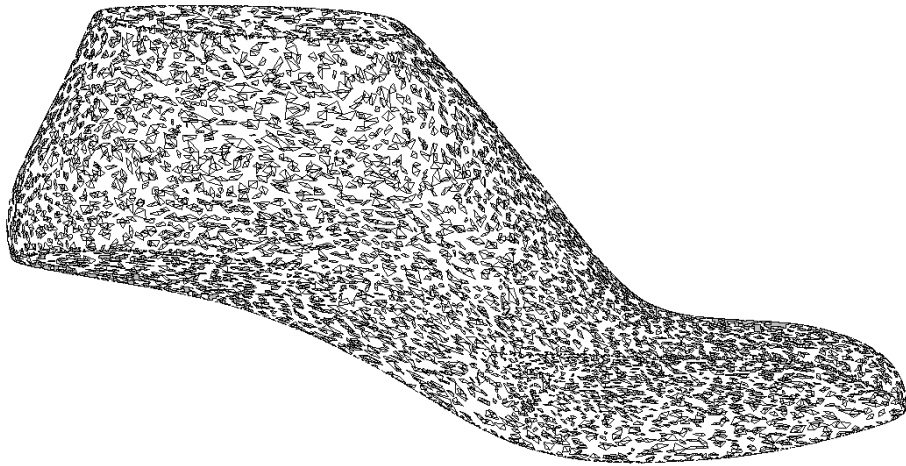
Nous illustrons Figures 2.24 et 2.25 nos résultats de recherche de quadrangles sur deux modèles 3D différents. Les Figures 2.24.a et 2.25.a représentent les maillages originaux des objets 3D. Les Figures 2.24.b et 2.25.b illustrent les quadrangles retenus avec la méthode basée sur la projection. Sur ces deux exemples nous remarquons que les quadrangles retenus par les deux méthodes sont répartis de façon homogène sur toute la surface des objets.

2.2.5.2 Influence du seuil de coplanarité

Cette méthode d'insertion utilise les mêmes contraintes de sélection que la méthode précédente pour la coplanarité et la convexité. Cependant elle propose une nouvelle manière de sélectionner les quadrangles dans l'objet 3D. Les courbes Figure 2.26 illustrent les capacités d'insertion de la méthode proposée en fonction des modèles 3D présentés dans le Tableau 2.1, et cela pour plusieurs valeurs du seuil de coplanarité S_c . L'axe des abscisses représente le type d'objet 3D utilisé, globalement des plus petits aux plus grands, et l'axe des ordonnées indique la capacité d'insertion de la méthode en pourcentage. Comme pour la méthode précédente, la capacité d'insertion augmente légèrement avec la taille de l'objet 3D. Lorsque que l'on augmente le seuil de coplanarité S_c cette différence de capacité entre les objets n'intervient plus. Pour un seuil de 10° qui ne présente pas de grosses distorsions sur la surface, la capacité d'insertion est supérieure à 15% sauf dans le cas d'objet de petite taille.

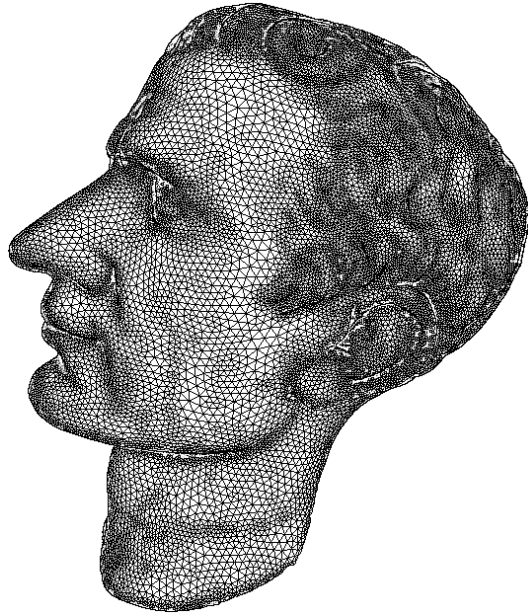


(a)



(b)

FIG. 2.24 – a) Maillage triangulé de la chaussure (31088 points, 62168 triangles), b) Quadrangles retenus avec la méthode basée sur la projection (5259 quadrangles) pour un seuil de coplanarité S_c de 20° .



(a)



(b)

FIG. 2.25 – a) Maillage triangulé du visage (43039 points, 85145 triangles), Quadrangles retenus avec la méthode basée sur la projection (9058 quadrangles) pour un seuil S_c de 20° .

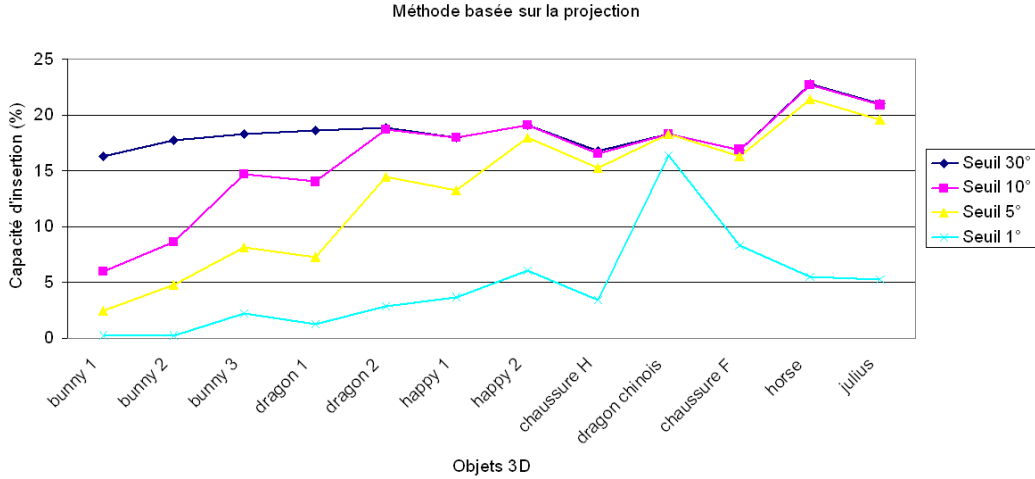


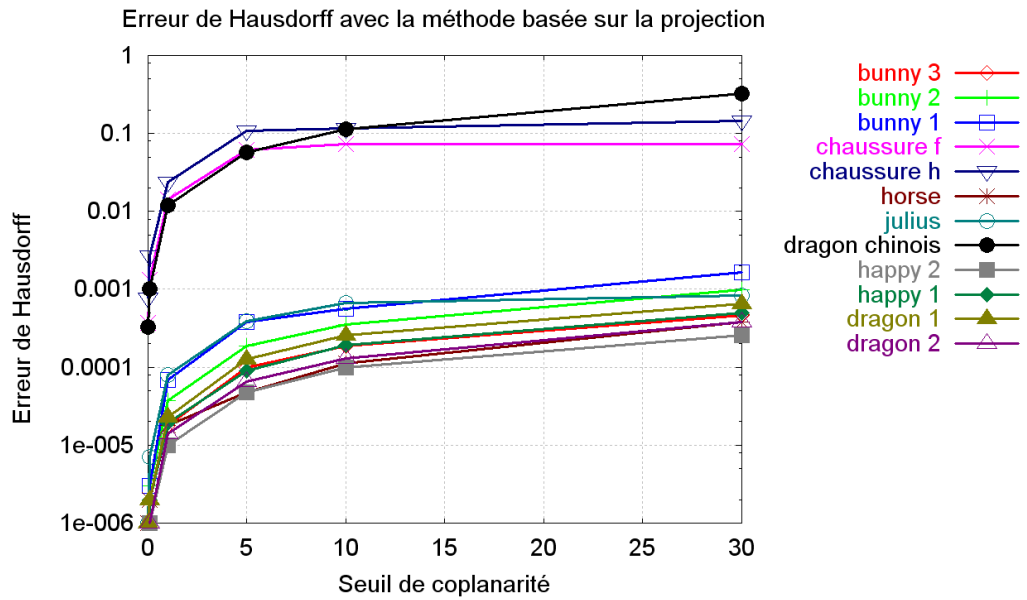
FIG. 2.26 – Taux d’insertion avec la méthode basée sur la projection.

2.2.5.3 Mesure d’erreur

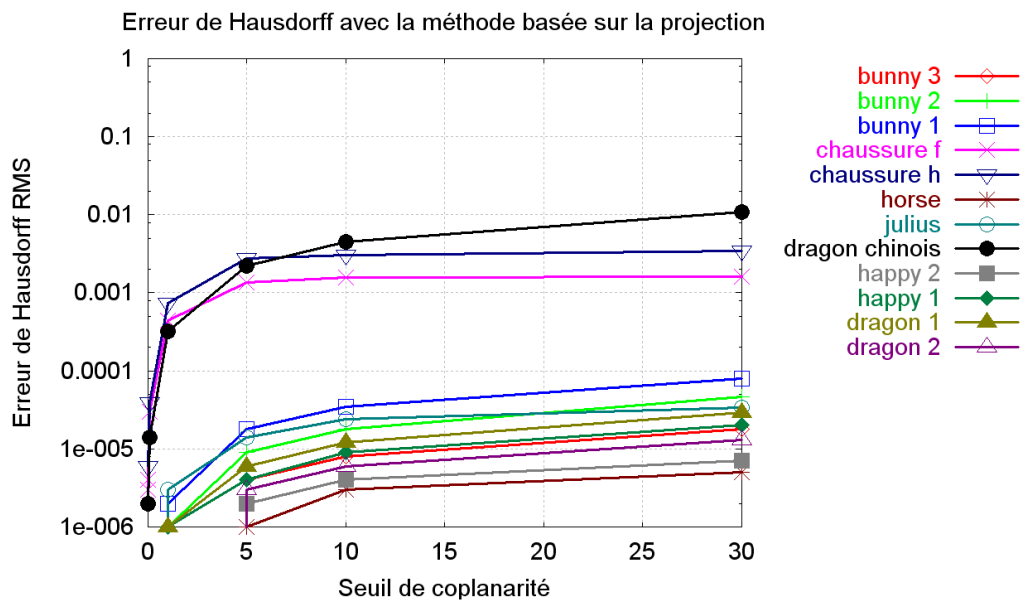
Pour la méthode basée sur la projection en fonction du seuil S_c , les Figures 2.27.a et 2.27.b illustrent respectivement les erreurs obtenues avec les méthodes de Hausdorff MAX et RMS. Dans tous les cas, nous constatons que, globalement, l’erreur augmente quand la valeur du seuil S_c augmente. Avec notre approche, nous remarquons que les deux mesures d’erreur (Hausdorff MAX et RMS) évoluent de la même manière mais que l’erreur de Hausdorff RMS reste toujours supérieure à l’erreur de Hausdorff MAX. Nous constatons également que l’erreur est différente en fonction des objets marqués et qu’elle est bien plus importante pour les trois objets *chaussure homme*, *chaussure femme* et *dragon chinois* comme pour la méthode précédente. Bien que toutes les mesures d’erreur calculées soient inférieures à 0.1 il est difficile de dire si le tatouage sera visible ou non. Comme pour la méthode précédente l’erreur est surtout visible au travers du changement de position de la normale, l’erreur géométrique est moindre et ne permet pas à elle seule de définir la perceptibilité de l’insertion.

2.2.5.4 Robustesse

Le troisième critère permet d’évaluer la résistance au bruit de la méthode. La Figure 2.28 représente la résistance de la méthode à l’ajout de bruit sur les sommets de l’objet 3D. Nous constatons que pour des bruits de faible amplitude tous les quadrangles marqués sont récupérés. Dès que le bruit augmente la quantité de quadrangles récupérés baisse de façon significative sauf pour trois des objets. Nous pouvons en déduire que la méthode est sensible à l’ajout de bruit. Cette sensibilité au niveau de la robustesse vient du fait que le bruit change la coplanarité des quadrangles mais aussi que le fait de ne pas récupérer certains quadrangles engendre des modifications sur la contrainte



(a)



(b)

FIG. 2.27 – Pour la méthode basée sur la projection, en fonction du seuil S_c , erreurs calculées par : a) La méthode de Hausdorff Max, b) La méthode de Hausdorff RMS.

de stabilité.

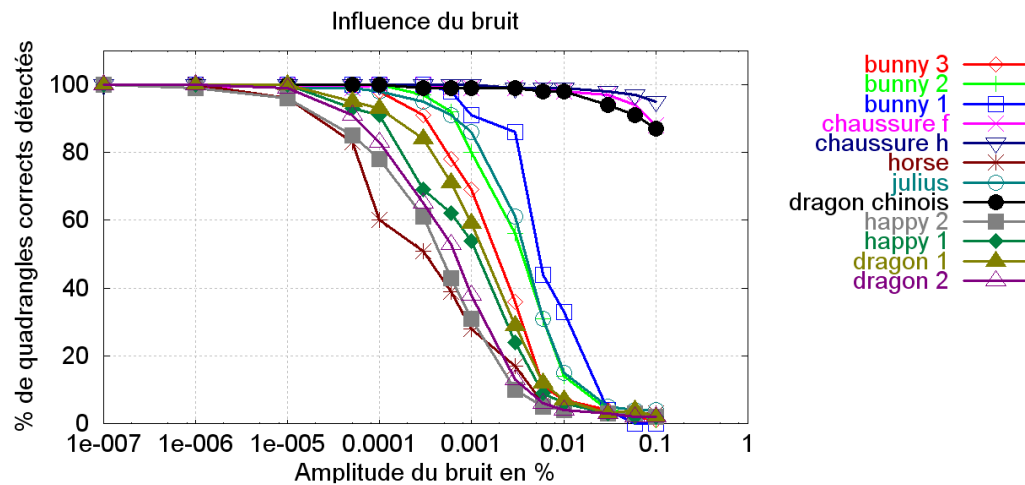


FIG. 2.28 – Influence du bruit sur la détection des quadrangles avec la méthode basée sur la projection.

2.2.5.5 Fiabilité

Les courbes ROC présentées Figure 2.29 permettent d’illustrer la sensibilité et la spécificité de la méthode en calculant les faux positifs ainsi que les faux négatifs au moment de l’extraction. A l’extraction, pour un bruit donné, nous avons fait varier le seuil d’extraction S_c . Nous constatons que dès que nous nous éloignons de la bonne valeur du seuil de coplanarité pour l’extraction, alors des faux positifs ainsi que des faux négatifs apparaissent. Ceci vient du fait que la contrainte de stabilité décrite section 2.1.4 est fortement perturbée pour cette méthode. La méthode basée sur la projection est donc sensible au bruit.

2.2.6 Conclusion

Dans cette partie nous avons présenté une méthode d’insertion de données cachées dans des objets 3D. Cette méthode s’appuie sur une recherche de zones particulières à l’aide de contraintes. La synchronisation de ces zones est faite en les projetant sur un axe défini par une clef secrète. L’insertion est faite dans la topologie du maillage dans les zones sélectionnées en s’appuyant sur l’axe utilisé pour la synchronisation. L’avantage de cette méthode, comme la précédente, est qu’elle ne modifie pas la position des sommets des objets 3D afin de réaliser l’insertion de données. La partie résultat a montré que cette méthode était fragile. Elle résiste comme voulu aux transformations affines mais ne résiste pas aux autres attaques potentielles. Expérimentalement, en fonction de la valeur

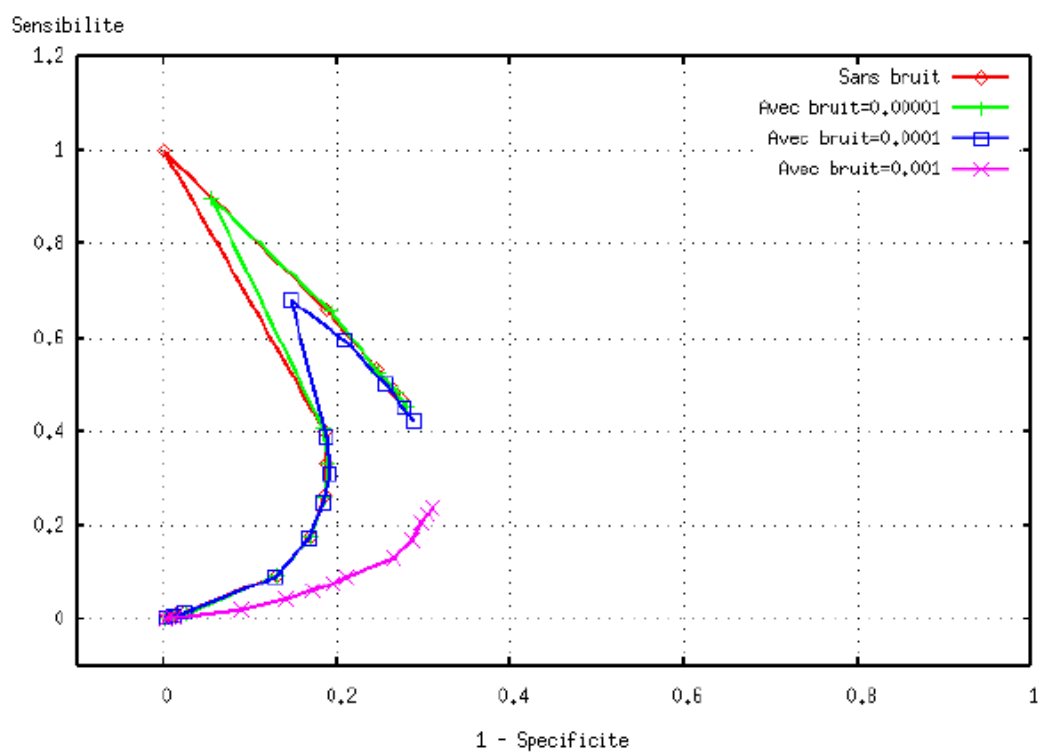


FIG. 2.29 – Courbes ROC : sensibilité en fonction de 1-spécificité, pour un seuil de coplanarité $S_c = 0.01$ pour la méthode basée sur la projection.

du seuil S_c il est possible d'obtenir une capacité d'insertion supérieure $N/10$ bits, si N est le nombre de sommet de l'objet 3D. Cette capacité d'insertion est petite comparée aux méthodes où par exemple $N - 2$ bits sont insérés. Ceci est dû à une contrainte forte sur la position des sommets, puisque dans nos méthodes la position des sommets de l'objet reste inchangée. Cette section a fait l'objet des publications [APDP08b, APDP07a, APDP07b].

2.3 Comparaison des méthodes

Dans cette section nous comparons nos deux méthodes d'insertion de données cachées. Cette comparaison est faite pour l'influence du seuil de coplanarité section 2.3.1, pour la mesure d'erreur section 2.3.2 et pour la robustesse et la sécurité section 2.3.3.

2.3.1 Influence du seuil de coplanarité

La Figure 2.30 illustre la capacité d'insertion des deux méthodes en fonction du seuil de coplanarité S_c . L'axe des abscisses représente le seuil de coplanarité S_c utilisé pour la recherche des quadrangles. La courbe *ACM* représente la capacité d'insertion moyenne pour la méthode basée sur l'ACM et la courbe *Projection* représente la moyenne pour la méthode basée sur la projection. Les moyennes sont calculées à partir de l'ensemble des objets 3D présentés dans le Tableau 2.1. Nous pouvons remarquer que la capacité d'insertion augmente avec le seuil de coplanarité S_c . Cette courbe nous permet de confirmer également que le seuil de coplanarité S_c a plus d'influence sur la méthode basée sur la projection que sur la méthode basée sur l'ACM. La capacité d'insertion de la méthode basée sur la projection, est toujours supérieure à celle de la méthode basée sur l'ACM, quel que soit le nombre de sommet du modèle 3D et le seuil S_c utilisé.

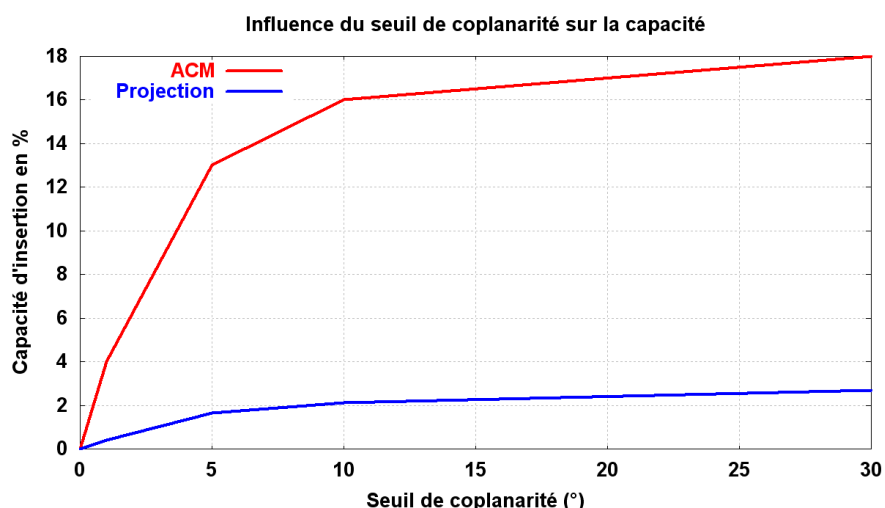


FIG. 2.30 – Evolution de la capacité d'insertion en fonction du seuil de coplanarité S_c .

2.3.2 Mesure d'erreur

Avec nos deux approches, nous remarquons que les deux mesures d'erreur (Hausdorff MAX et RMS) évoluent de la même manière quelle que soit la méthode d'insertion utilisée. Les Figures 2.31 illustrent le calcul d'erreur de Hausdorff MAX et de l'erreur de Hausdorff RMS. Les courbes représentent la moyenne des erreurs calculées sur l'ensemble des objets 3D du Tableau 2.1. Nous constatons que les mesures d'erreur sont faibles (inférieure à 0.1) et sensiblement les mêmes pour les deux méthodes d'insertion.

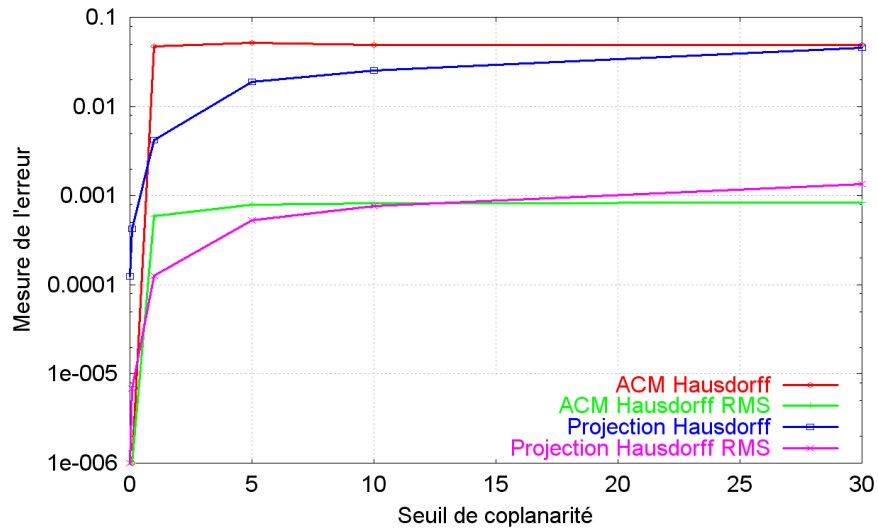


FIG. 2.31 – Comparaison de l'erreur des deux méthodes d'insertion proposées en fonction du seuil S_c , calculée par la méthode de Hausdorff et par la méthode de Hausdorff RMS.

2.3.3 Robustesse et fiabilité

Les courbes Figure 2.32 représentent la robustesse moyenne des deux méthodes proposées. Nous remarquons que la méthode basée sur l'ACM est plus robuste que la méthode basée sur la projection. Cette différence est due à la contrainte de stabilité de la méthode par projection. Dans le cas de la perte d'un quadrangle cette contrainte peut engendrer beaucoup de modifications pour la sélection des quadrangles suivants.

Les Figures 2.18.a et 2.29.b illustrent la sensibilité en fonction de 1-spécificité respectivement de la méthode basée sur l'ACM et de la méthode basée sur la projection. Nous remarquons que la méthode basée sur la projection est plus sensible et donc moins sûre à l'extraction que la méthode basée sur l'ACM. Cette sensibilité est due, comme pour la robustesse, à la contrainte de stabilité de la méthode par projection.

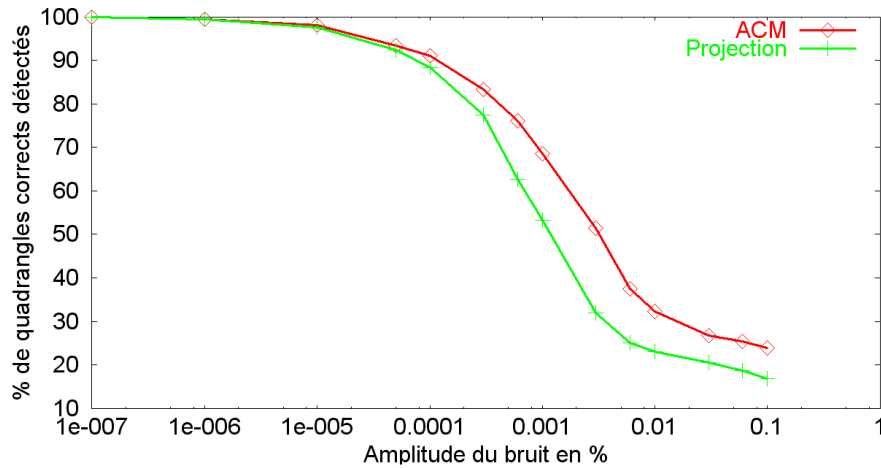


FIG. 2.32 – Comparaison de la robustesse des deux méthodes proposées.

2.4 Applications industrielles

Dans cette section nous présentons des applications industrielles possibles de nos méthodes d'insertion de données cachées dans le cadre des formes numériques de chaussure. Les applications présentées sont liées à la capacité d'insertion des méthodes développées.

2.4.1 Insertion d'un logo

Une première application possible de nos méthodes est l'insertion d'un logo dans un objet 3D. Le logo peut être une petite image comme illustré Figure 2.33.a ou un objet 3D de taille réduite comme illustré Figure 2.33.b. Le logo est inséré de façon invisible dans l'objet 3D. A la réception, l'objet est visible pour tout le monde sans le logo. Par contre, uniquement les personnes possédant la clef peuvent extraire le logo pour l'afficher.



(a)



(b)

FIG. 2.33 – a) Exemple de logo 2D, b) Exemple de logo 3D.

2.4.2 Insertion des lignes de style

Le message qui est inséré dans l'objet 3D représente ici les lignes de style de l'objet. Pour les personnes ne possédant pas la clef, l'objet est utilisable mais aucune ligne n'est visible comme illustré Figure 2.34.a. Les personnes possédant la clef pourront extraire les lignes de style comme illustré Figure 2.34.b. Cette approche permet de sécuriser les lignes de style faite par les dessinateurs sur l'objet 3D. Cet approche est intéressante mais dépend de la taille des données nécessaires pour la sauvegarde des lignes de style.

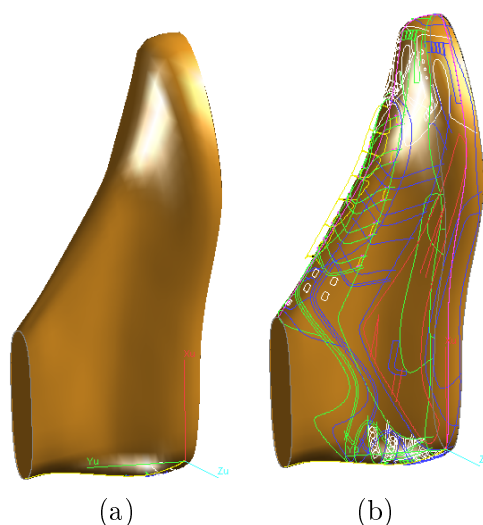


FIG. 2.34 – a) Chaussure 3D avec lignes de style cachées, b) Chaussure 3D avec lignes de style visibles.

2.4.3 Insertion de la texture et de la couleur

Le message inséré dans ce cas représente la texture ou la couleur de l'objet lui même, de cette façon l'objet peut être utilisé tel quel sans pouvoir utiliser les informations de texture et de couleur, uniquement les personnes possédant la clef pourront extraire la texture et la couleur. La Figure 2.35.a illustre un modèle 3D de chaussure sans texture et la Figure 2.35.b le modèle avec la texture.

2.4.4 Vérification de l'intégrité des données

Le problème rencontré dans la fabrication des chaussures est la séparation entre les stylistes qui sont généralement en Europe et les fabricants qui sont situés en Asie ou en Amérique du sud. Le but de cette approche est d'assurer que les chaussures qui vont être fabriquées correspondent bien au modèle envoyé par le fabricant. Nous utilisons une caractéristique de nos méthodes qui est la fragilité. En effet, comme nos méthodes sont fragiles, il est possible de les utiliser afin de garantir l'intégrité des objets 3D. Ici le



FIG. 2.35 – a) Chaussure 3D avec la texture cachée, b) Chaussure 3D avec la texture visible.

message inséré est la signature numérique d'un fabricant. A la réception la signature est extraite puis comparée à la signature originale du fabricant. Si il y a modification de l'objet 3D alors la signature extraite sera différente de la signature originale, il est alors possible d'en déduire que l'objet a subi une modification.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté deux nouvelles méthodes d'insertion de données cachées dans des objets 3D. Les méthodes présentées ont la caractéristique de ne pas modifier la position des sommets de l'objet 3D. Contrairement aux méthodes précédentes appartenant à cette catégorie, notons que nos approches diffusent le message à cacher dans tout l'objet et ne rajoutent pas de points supplémentaires. Les deux méthodes présentées, bien que très proches proposent deux façons bien distinctes de synchroniser les zones d'insertion avec le modèle 3D. L'une se base sur la construction d'un ACM alors que l'autre utilise un axe clef ou sont projetées les zones d'insertion pour leur synchronisation. Les méthodes de marquage sont elles aussi différentes car liées à la synchronisation. La première méthode s'appuie donc sur l'ACM construit au préalable afin d'insérer les bits du message alors que la seconde méthode s'appuie sur la projection des points des zones d'insertion sur l'axe clef. Ces méthodes, malgré leurs différences dans la synchronisation et le marquage, nous autorisent des modifications telles que les rotations, les translations et les mises à l'échelle uniforme. De plus, la modification des données directement dans le fichier marqué ne perturbe absolument pas l'extraction du message. Notons que ces deux méthodes sont totalement aveugles et de grande capacité, notamment la méthode basée sur la projection nous permet d'insérer jusqu'à 0.19 bit par sommet en fonction du seuil S_c choisi. Ces méthodes permettent donc d'insérer dans un fichier 3D, des méta-données sans augmenter la taille du fichier original tout en conservant la position initiale exacte des points 3D. En perspective, nous envisageons de fusionner ces deux méthodes en gardant la méthode de recherche des zones d'insertion basée sur les contraintes, comme sur la seconde méthode, mais

en faisant le marquage à l'aide de l'ACM. Ceci nous permettra d'avoir un bon taux d'insertion en s'abstrayant de la recherche de connexité particulière de l'ACM tout en conservant la stabilité de celui ci pour réaliser le marquage. Nous envisageons également de développer une nouvelle méthode basée sur ces approches afin de résister à des changements géométriques importants.

Conclusion et perspectives

Contexte de la thèse

Cette thèse s'est inscrite dans le cadre d'un contrat CIFRE entre la société STRATEGIES localisée à Rungis et le LIRMM (Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier), UMR 5506 CNRS/UM2. Le marché autour des digitaliseurs a fortement augmenté, des digitaliseurs 3D répondant aux critères souhaités par la société STRATEGIES sont apparus comme par exemple le scanner *NextEngine*². Des tests sur ce digitaliseur fait par la société montrent que les résultats sont convainquant et assez bons. De plus en parallèle de nos travaux, la société a mis au point un système permettant d'acquérir les lignes de style sur les formes intérieures de chaussures. La méthode récupère dans un premier temps la texture de l'objet où les lignes sont dessinées puis plaque la texture avec les lignes sur un nouvel objet. Il est alors possible de copier les lignes de style à l'aide d'outils proposés par la société. Cet outil appelé *ScanLine* fait suite à des travaux que nous avons commencé en 2005 durant mon séjour dans l'entreprise. Une nouvelle problématique de plus en plus d'actualité pour l'entreprise est la protection des formes numériques avant le transfert pour la fabrication. Au niveau international, il leur paraît maintenant nécessaire et bientôt incontournable de protéger la forme pour vérifier sa provenance ou son authenticité. Il est aussi important pour la société de mettre en place un système de tatouage robuste afin de résister à des modifications peu importantes de l'objet. Pour cela, la société STRATEGIES envisage de continuer des travaux dans ce domaine dans le cadre d'une nouvelle thèse CIFRE afin de poursuivre dans cet axe de recherche.

La digitalisation d'objets 3D

Résultats obtenus

Dans le cadre de ces travaux nous avons développé une méthode de digitalisation d'objets 3D basée sur les silhouettes. Les résultats obtenus sur des formes simples semblent satisfaisants, cependant les modèles qui nous intéressent sont les formes de chaussures. Pour ce type d'objet la distorsion engendrée par le digitaliseur est trop importante pour que les formes issues du digitaliseur soient utilisables industriellement.

²<https://www.nextengine.com>

Perspectives

Voici les quelques points qu'il est nécessaire d'améliorer afin de rendre le digitaliseur plus précis :

- Amélioration du système de calibrage des caméras.
- Identification de l'axe de rotation du moteur et recalage avec l'axe de calibrage de la caméra.
- Passage à l'octree pour alléger la taille des données en mémoire et augmenter la précision sur la surface de l'objet.
- Utilisation de la théorie des possibilités afin d'améliorer la précision du volume reconstruit.
- Utiliser un autre espace couleur afin d'améliorer la reconstruction de la texture.

Une fois que le système d'acquisition aura atteint un niveau de définition suffisant, il serait intéressant de se pencher sur la récupération des lignes de style. Cet aspect, que nous n'avons finalement pas abordé, est un point qui reste intéressant pour la société STRATEGIES.

Le tatouage d'objets 3D

Résultats obtenus

Le tatouage d'objets 3D s'est beaucoup développé malgré le faible développement de la théorie du traitement numérique de la géométrie comparée à celle du traitement du signal. Les principales applications concernent la protection des droits d'auteurs, l'authentification, le contrôle de copie et la vérification d'intégrité. Dans ces travaux de thèse nous avons développé deux nouvelles méthodes fragiles de tatouage d'objets 3D à grande capacité. Ces méthodes ont la caractéristique de ne pas modifier la position géométrique des sommets. Le tatouage est fait dans la topologie du maillage en modifiant la constitution des cotés de triangles particuliers. Ces deux méthodes présentent l'avantage, par rapport aux méthodes existantes de tatouage topologique, de ne pas augmenter la taille du fichier de données. A l'heure actuelle, avec la méthode basée sur la projection, des topologies spécifiques du maillage introduisent des conflits au moment de l'extraction. Par contre, dans le cas de l'approche basée sur l'ACM, un module en cours de validation va être intégré dans le logiciel de la société.

Perspectives

Afin d'améliorer la capacité d'insertion de la méthode basée sur l'ACM il faudrait trouver un moyen de sélectionner les quadrangles sans utiliser la spécificité du nœud avec trois arêtes. Nous envisageons pour cela de fusionner les deux méthodes proposées en gardant la méthode de recherche des zones d'insertion basée uniquement sur les contraintes, mais en faisant le marquage à l'aide de l'ACM. Ceci nous permettra d'avoir un taux d'insertion plus important tout en conservant la stabilité de l'insertion basée sur l'ACM pour réaliser le marquage. Une autre perspective intéressante est de rendre la méthode réversible. Il faut pour cela que les quadrangles sélectionnés aient tous comme

base commune une arête de l'ACM. Il est peut être possible de changer la méthode de construction de l'ACM de façon à répondre à cette contrainte. Nous cherchons aussi des méthodes de construction de graphes plus stable que l'ACM. Pour la méthode basée sur les projections une analyse approfondie concernant la contrainte de stabilité doit être faite afin que l'extraction soit plus sûre.

Publications de l'auteur

Revue Internationale

[APDP08a] P. Amat, W. Puech, S. Druon and J-P. Pedebay, Data Hiding Method Based on MST and the Topology Change of a 3D Triangular Mesh. Signal Processing Image Communication, elsevier, 2008. (Soumise)

Revue Nationale

[APDP08b] P. Amat, W. Puech, S. Druon et J-P. Pedebay, Dissimulation de données par changement de connexité d'un maillage 3D. Traitement du Signal, vol(25), num(3), juin 2008.

Conférences Internationales

[APDP07a] P. Amat, W. Puech, S. Druon and J-P. Pedebay, A Data Hiding Method Based on the Topology Change of a 3D Triangular Mesh. 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO'07), Poznan, Poland, 2007.

[APDP08c] P. Amat, W. Puech, S. Druon, J-P. Pedebay, Lossless Data Hiding Method Based on MST and the Topology Change of a 3D Triangular Mesh. 16th European Signal Processing Conference (EUSIPCO'08), Lausanne, Switzerland, 2008.

Conférences Nationales

[AP05] P. Amat et W. Puech, Transfert sécurisée d'une ROI sans perte par une méthode d'insertion de données cachées robuste à la compression JPEG. 20ème Colloque sur le traitement du Signal et des Images (GRETSI'05), Louvain-la-Neuve, Belgique, 2005.

[APDP07b] P. Amat, W. Puech, S. Druon et J-P. Pedebay, Dissimulation de données par changement de connexité d'un maillage 3D. 12èmes Journées d'Etude et d'Echange Compression et REprésentation des Signaux Audiovisuels (CORESA'07), Montpellier, France, 2007.

Bibliographie

- [AB98] N. Amenta and M. Bern. Surface Reconstruction by Voronoi Filtering. In *Proc. 14th annual Symposium on Computational Geometry (SCG98)*, pages 39–48, New York, NY, USA, 1998.
- [AG05] P. Alliez and C. Gotsman. Recent Advances in Compression of 3D Meshes. In *Advances in Multiresolution for Geometric Modelling*, pages 3–26, 2005.
- [ALSS99] P. Alliez, N. Laurent, H. Sanson, and F. Schmitt. Mesh Approximation using a Volume-Based Metric. In *Proc. 7th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG '99)*, pages 292–301, 1999.
- [AP05] P. Amat and Puech. Transfert sécurisée d'une ROI sans perte par une méthode d'insertion de données cachées robuste à la compression JPEG. *20ème Colloque sur le traitement du Signal et des Images (GRETSI'05)*, 2005.
- [AP07] P. Agarwal and B. Prabhakaran. Robust Blind Watermarking Mechanism for Point Sampled Geometry. In *Proc. 9th Workshop on Multimedia & security (MM&Sec '07)*, pages 175–186, New York, NY, USA, 2007.
- [APDP07a] P. Amat, W. Puech, S. Druon, and J. P. Pedeboy. A Data Hiding Method Based on the Topology Change of a 3D Triangular Mesh. *15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO '07)*, 2007.
- [APDP07b] P. Amat, W. Puech, S. Druon, and J. P. Pedeboy. Dissimulation de données par changement de connexité d'un maillage 3D. *12èmes Journées d'Etude et d'Echange COMpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels (CORESA'07)*, 2007.
- [APDP08a] P. Amat, W. Puech, S. Druon, and J. P. Pedeboy. Data Hiding Method Based on MST and the Topology Change of a 3D Triangular Mesh. *Journal Signal Processing : Image Communication*, 2008.
- [APDP08b] P. Amat, W. Puech, S. Druon, and J. P. Pedeboy. Dissimulation de Données par Changement de Connexité d'un Maillage 3D. *Revue Traitement du Signal*, 25(3), 2008.
- [APDP08c] P. Amat, W. Puech, S. Druon, and J. P. Pedeboy. Lossless Data Hiding Method Based on MST and the Topology Change of a 3D Triangular Mesh. *16th European Signal Processing Conference (EUSIPCO '08)*, 2008.

- [Bau74] B. G. Baumgart. *Geometric Modeling for Computer Vision*. PhD thesis, Stanford, CA, USA, 1974.
- [BC01] J. D. Boissonnat and F. Cazals. Natural Neighbor Coordinates of Points on a Surface. In *Computational Geometry*, volume 19, pages 155–173, 2001.
- [BD06] J. Bennour and J. L. Dugelay. Watermarking of 3D Objects based on 2D Apparent Contours. In *Proc. 18th Annual Symposium on Electronic Imaging*, volume 6072, San Jose, USA, January 2006.
- [Ben99a] O. Benedens. Geometry-Based Watermarking of 3D Models. *IEEE Computer Graphics and Application*, 19(1) :46–55, 1999.
- [Ben99b] O. Benedens. Two High Capacity Methods for Embedding Public Watermarks into 3d Polygonal Models. *Proc. Multimedia and Security-Workshop at ACM Multimedia*, pages 95–99, 1999.
- [Ben00] O. Benedens. Affine Invariant Watermarks for 3D Polygonal and NURBS Based Models. In *Proc. 3rd International Workshop on Information Security (ISW '00)*, pages 15–29, London, UK, 2000.
- [BGML96] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto, and A. Lu. Techniques for Data Hiding. *IBM Syst. J.*, 35(3-4) :313–336, 1996.
- [BH89] M. J. Brooks and B. K. P. Horn. Shape and Source from Shading. In B. K. P. Horn and M. J. Brooks, editors, *Shape from Shading*, pages 53–68, Cambridge, MA, 1989.
- [Bor06] A. G. Bors. Watermarking Mesh-Based Representations of 3-D Objects Using Local Moments. *IEEE Transaction on Image Processing*, 15(3) :687–701, mar 2006.
- [CC98] K. L. Chung and L. C. Chang. Large Encrypting Binary Images with Higher Security. In *Pattern Recognition Letters*, volume 19, pages 461–468, 1998.
- [CCDG04] F. Courteille, A. Crouzil, J. D. Durou, and P. Gurdjos. Towards Shape from Shading under Realistic Photographic Conditions. In *Proc. 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04)*, volume 2, pages 277–280, Washington, DC, USA, 2004.
- [Cho60] G. Choquet. Le Théorème de Représentation Intégrale dans les Ensembles Convexes Compacts. In *Annales de l'Institut Fourier*, volume 10, pages 333–344, 1960.
- [CKLS97] I. J. Cox, J. Kilian, T. Leighton, and T. Shamoan. Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia. In *IEEE Transaction on Image Processing*, volume 6, pages 1673–1687, 1997.
- [CL96] B. Curless and M. Levoy. A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images. In *Proc. 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '96)*, pages 303–312, New York, NY, USA, 1996.

- [CM03] F. Cayre and B. Macq. Data Hiding on 3D Triangle Meshes. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(4) :939–949, 2003.
- [Cos83] M. H. M. Costa. Writing on Dirty Paper. In *IEEE Transaction on Information Theory*, volume 29, pages 439–441, 1983.
- [CRS98] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno. METRO : Measuring Error on Simplified Surfaces. *Computer Graphics Forum*, 17(2) :167–174, 1998.
- [CSO97] S. I. Cho, H. Saito, and S. Ozawa. A Divide-and-Conquer Strategy in Recovering Shape of Book Surface from Shading. In *Proc. of the 9th International Conference on Image Analysis and Processing-Volume II (ICIAP '97)*, pages 262–269, London, UK, 1997.
- [DBQ97] A. Doncescu, A. Bouju, and V. Quillet. Former Books Digital Processing : Image Warping. In *Proc. Workshop on Document Image Analysis (DIA '97)*, page 5, Washington, DC, USA, 1997.
- [Del34] B. Delaunay. Sur la Sphère Vide. In *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*, pages 793–800, 1934.
- [DLG90] N. Dyn, D. Levine, and J. A. Gregory. A Butterfly Subdivision Scheme for Surface Interpolation with Tension Control. In *ACM Trans. Graph*, volume 9, pages 160–169, New York, NY, USA, 1990.
- [DP85] D. Dubois and H. Prade. Possibility Theory : an Approach to Computerized Processing of Uncertainty. In *Plenum Press*, London, 1985.
- [DS05] T. K. Dey and J. Sun. An Adaptive MLS Surface for Reconstruction with Guarantees. In *Proc. 3rd Eurographics Symposium on Geometry Processing (SGP '05)*, page 43, Vienna, Austria, 2005.
- [Ega75] J. Egan. Signal Detection Theory and ROC Analysis. In *Academic Press*, New York, 1975.
- [FK98] O. D. Faugeras and R. Keriven. Complete Dense Stereovision Using Level Set Methods. In *Proc. of the 5th European Conference on Computer Vision-Volume I (ECCV '98)*, pages 379–393, London, UK, 1998.
- [FL95] P. Fua and Y. G. Leclerc. Object-Centered Surface Reconstruction : Combining Multi-Image Stereo and Shading. *Int. J. Computer Vision*, 16(1) :35–55, 1995.
- [FT87] O.D. Faugeras and G. Toscani. Camera Calibration for 3D Computer Vision. In *Proc. IEEE on Industrial Application of Machine Vision and Machine Intelligence*, Tokyo, Japan, 1987.
- [GH97] M. Garland and P. Heckbert. Surface Simplification Using Quadric Error Metrics. volume 31, pages 209–216, 1997.
- [GSS99] I. Guskov, W. Sweldens, and P. Schröder. Multiresolution Signal Processing for Meshes. In *Proc. 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '99)*, pages 325–334, New York, NY, USA, 1999.

- [Han89] M.J. Hannah. A System for Digital Stereo Image Matching. In *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, volume 55, pages 1765–1770, 1989.
- [HDD⁺92] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle. Surface Reconstruction from Unorganized Points. In *Proc. 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '92)*, pages 71–78, New York, NY, USA, 1992.
- [HG98] F. Hartung and B. Girod. Watermarking of Uncompressed and Compressed Video. *Signal Processing*, 66(3) :283–301, 1998.
- [Hof89] C. M. Hoffmann. *Geometric and Solid Modeling : An Introduction*. San Francisco, CA, USA, 1989.
- [ICA02] S. Ichikawa, H. Chiyama, and K. Akabane. Redundancy in 3D Polygon Models and Its Application to Digital Signature. In *Proc. 10th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG '02)*, pages 225–232, 2002.
- [IS03] J. Isidoro and S. Sclaroff. Stochastic Refinement of the Visual Hull to Satisfy Photometric and Silhouette Consistency Constraints. In *Proc. 9th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '03)*, page 1335, Washington, DC, USA, 2003.
- [JJ98] N. F. Johnson and S. Jajodia. Exploring Steganography : Seeing the Unseen. In *IEEE Computer*, volume 31, pages 26–34, 1998.
- [JYS00] H. Jin, A. Yezzi, and S. Soatto. Stereoscopic Shading : Integrating Multi-Frame Shape Cues in a Variational Framework. pages 1169–1176, 2000.
- [KDK98] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami. Digital Watermarking for 3D Polygons using Multiresolution Wavelet Decomposition. *Proc. 6th International Workshop Geometric Modeling : Fundamentals and Applications*, pages 296–307, Decembre 1998.
- [Ker83] A. Kerckhoffs. La Cryptographie Militaire. 9 :5–38, 1883.
- [KKK02] S. J. Kim, S. K. Kim, and C. H. Kim. Discrete Differential Error Metric for Surface Simplification. In *Proc. 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG '02)*, page 276, Washington, DC, USA, 2002.
- [Kru56] J. B. Kruskal. On the Shortest Spanning Tree of a Graph and the Traveling Saleman Problem. *Proc. American Mathematical Society*, 7 :48–50, 1956.
- [KS00] K. N. Kutulakos and S. M. Seitz. A Theory of Shape by Space Carving. In *International Journal of Computer Vision*, volume 38, pages 199–218, 2000.
- [Lau94] A. Laurentini. The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(2) :150–162, 1994.

- [LBK91] C. E. Liedtke, H. Busch, and R. Koch. Shape Adaptation for Modelling of 3D Objects in Natural Scenes. In *Proc. IEEE International Conference Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '91)*, pages 704–705, 1991.
- [LC87] W. E. Lorensen and H. E. Cline. Marching Cubes : A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. *SIGGRAPH Computer Graphic.*, 21(4) :163–169, 1987.
- [LCK02] J. J. Lee, N. I. Cho, and J. W. Kim. Watermarking for 3D NURBS Graphic Data. In *Proc. IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing*, pages 304–307, 2002.
- [LDB05] G. Lavoué, F. Dupont, and A. Baskurt. High Rate Compression of CAD Meshes Based on Subdivision Inversion. *Annals of Telecommunications*, 60(11-12) :1284–1308, decembre 2005.
- [LDD07] G. Lavoué, F. Denis, and F. Dupont. Subdivision Surface Watermarking. *Computers & Graphics*, 31(3) :480–492, 2007.
- [LDGD⁺06] G. Lavoué, E. Drelie Gelasca, F. Dupont, A. Baskurt, and T. Ebrahimi. Perceptually Driven 3D Distance Metrics with Application to Watermarking. In *Proc. SPIE Applications of Digital Image Processing XXIX*, San Diego, august 2006.
- [Loo87] C. Loop. Smooth Subdivision Surface Based on Triangle. In *University of Utah, Departement of Mathematics*, 1987.
- [LPC⁺00] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, and D. Fulk. The Digital Michelangelo Project : 3D Scanning of Large Statues. In *Proc. 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '00)*, pages 131–144, New York, NY, USA, 2000.
- [MFK99] Y. Matsumoto, K. Fujimura, and T. Kitamura. Shape from Silhouette/Stereo and Its Application to 3-D Digitizer. In *Proc. 8th International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery (DCGI '99)*, pages 177–190, London, UK, 1999.
- [MSI01] X. Mao, M. Shiba, and A. Imamiya. Watermarking 3D Geometric Models through Triangle Subdivision. In P. W. Wong and E. J. Delp, editors, *Proc. SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents III*, volume 4314 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, pages 253–260, aug 2001.
- [OMA97] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono. Watermaking Three-Dimensional Polygonal Models. In *Proc. 5th ACM International Conference on Multimedia (MULTIMEDIA '97)*, pages 261–272, New York, NY, USA, 1997.
- [OMT02] R. Ohbuchi, A. Mukaiyama, and S. Takahashi. A Frequency-Domain Approach to Watermarking 3D Shapes. *Computer Graphics Forum*, 21(3) :373–382, 2002.

- [PF03] E. Prados and O. Faugeras. "Perspective Shape from Shading" and Viscosity Solutions. In *Proc. 9th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '03)*, page 826, Washington, DC, USA, 2003.
- [PHF99] E. Praun, H. Hoppe, and A. Finkelstein. Robust Mesh Watermarking. In Alyn Rockwood, editor, *Proc. 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (Siggraph '99)*, pages 49–56, Los Angeles, 1999.
- [Pot87] M. Potmesil. Generating Octree Models of 3D Objects from their Silhouettes in a Sequence of Images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 40(1) :1–29, 1987.
- [Pri57] R. C. Prim. Shortest Connection Networks and some Generalisations. *Bell System Technical Journal*, 36 :1389–1401, 1957.
- [RAM06] P. Rondao-Alface and B. Macq. Shape Quality Measurement for 3D Watermarking Schemes. In *Electronic Imaging, Security and Watermarking of Multimedia Contents VIII*, San Jose, California, 2006.
- [RAMC07] P. Rondao-Alface, B. Macq, and F. Cayre. Blind and Robust Watermarking of 3D Models :How to Withstand the Cropping Attack? In *Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP07)*, pages 465–468, 2007.
- [Req80] A. Requicha. Representaiton of Rigid Solid Objects. In *Computer Aided Design : Modelling, Systems Engineering, CAD-Systems - CREST Advanced Course*, pages 1–78, London, UK, 1980.
- [RR99] J. Rossignac and A. Requicha. Solid Modeling. In *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 1999.
- [SBD86] F. J. M. Schmitt, B. A. Barsky, and W. H. Du. An Adaptive Subdivision Method for Surface-Fitting from Sampled Data. In *Proc. 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '86)*, pages 179–188, New York, NY, USA, 1986.
- [SC07] O. Strauss and F. Comby. Variable Kernel Fuzzy Morphological Operations for Single Viewpoint Omnidirectional Images. In *Pattern Recognition*, volume 40, pages 3578–3596, 2007.
- [Sch95] B. Schneier. Applied Cryptography. In *Wiley*, 1995.
- [SCMS01] G. Slabaugh, G. Culbertson, W. B. Malzbender, and T. Shafer. A Survey of Methods for Volumetric Scene Reconstruction from Photographs. *International Workshop on Volume Graphics*, 2001.
- [SD99] S. M. Seitz and C. R. Dyer. Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring. *Int. J. Computer Vision*, 35(2) :151–173, 1999.
- [SP98] S. Sullivan and J. Ponce. Automatic Model Construction and Pose Estimation From Photographs Using Triangular Splines. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(10) :1091–1097, 1998.

- [Sti95] D. Stinson. Cryptography - Theory and Practice. In *CRC Press*, 1995.
- [VF92] R. Vaillant and O. D. Faugeras. Using Extremal Boundaries for 3-D Object Modeling. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2) :157–173, 1992.
- [Vor08] G. Voronoï. Nouvelles Applications des Paramètres Continus à la Théorie des Formes Quadratiques. In *J. Reine u. Angew*, number 134, pages 198–287, 1908.
- [VP04] S. Valette and R. Prost. Wavelet-Based Progressive Compression Scheme for Triangle Meshes : Wavemesh. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(2), 2004.
- [Wag00] M. G. Wagner. Robust Watermarking of Polygonal Meshes. In *Proc. Geometric Modeling and Processing (GMP '00)*, pages 201–208, Washington, DC, USA, 2000.
- [WLDB07] K. Wang, G. Lavoué, F. Denis, and A. Baskurt. Hierarchical Blind Watermarking of 3D Triangular Meshes. In *Proc. IEEE International Conference on Multimedia & Expo*, pages 1235–1238, jul 2007.
- [WLDB08] K. Wang, G. Lavoué, F. Denis, and A. Baskurt. A Fragile Scheme for Authentication of Semi-Regular Meshes. In *Proc. 29th Annual Conference of the European Association for Computer Graphics*, pages 5–8, Crete, Greece, 2008.
- [YPSZ01] K. Yin, Z. Pan, J. Shi, and D. Zhang. Robust Mesh Watermarking based on Multiresolution Processing. *Computers and Graphics*, 25 :409–420, June 2001.

Table des figures

1	Chaîne de fabrication de la chaussure.	8
1.1	Exemple de nuage de points.	18
1.2	Exemple de rendu avec l'utilisation de surfels.	19
1.3	Exemple de rendu avec une soupe de polygones.	20
1.4	Exemple de rendu d'un tore avec l'utilisation de voxels.	20
1.5	Découpage d'un objet avec une approche en Octree.	21
1.6	Exemple d'arbre CSG.	22
1.7	Exemple de maillage sur une forme intérieure de chaussure.	23
1.8	Exemple de surface NURBS.	25
1.9	Méthode de subdivision de Loop. A gauche le maillage original, à droite les maillages après 1 et 2 étapes de subdivision.	25
1.10	Exemple de configuration d'un voxel.	27
1.11	a) Triangulation de Delaunay, b) Diagramme de Voronoï.	28
1.12	a) Modèle original, b) translation, c) rotation, d) changement d'échelle.	29
1.13	a) Modèle original, b) Ajout de bruit, c) Lissage, d) Rehaussement.	30
1.14	a) Modèle original, b) Modèle avec déformation locale, c) Modèle avec un fenêtrage.	31
1.15	a) Maillage original, b) Remaillage.	32
1.16	Représentation de l'erreur quadrique.	34
1.17	Aperçus des méthodes d'acquisition d'objets 3D.	36
1.18	a) Illustration d'acquisition par laser point, b) Exemple d'utilisation d'un laser plan sur un objet 3D.	37
1.19	a) Photographie de l'objet réel, b) Photographie de l'objet avec lumière structurée, c) Objet 3D modélisé.	38
1.20	Principe de la stéréovision.	39
1.21	Exemple de reconstruction avec une approche <i>visual hull</i>	40
1.22	Exemple de reconstruction de formes à partir de l'ombrage <i>shape from shadow</i>	41
2.1	Classification des différentes techniques d'écriture secrète.	44
2.2	Compromis entre robustesse, invisibilité et capacité.	46
2.3	Schéma général du tatouage aveugle.	49
2.4	Schéma général du tatouage informé.	49

2.5	Exemple d'insertion informée où V_0 représente la données originale et V_0' la donnée modifiée après l'insertion d'un 0.	49
2.6	a) Construction de la bande de triangle à partir du message 10101101011, b) Bande de triangle déconnectée du maillage original.	53
2.7	Division d'un triangle en quatre triangles plus petits.	53
2.8	a) Exemple de triangle de base utilisé pour rechercher des triangles similaires, b) Exemple d'insertion sur un triangle.	55
2.9	Exemple d'insertion du message "3d embedding" sur un maillage.	55
2.10	a) Maillage original avant insertion, b) Maillage avec insertion du message 010.	56
2.11	a) Nuage de points original, b) Nuage de points partitionné en clusters, chaque cluster est organisé en graphe avec une représentation des sommets cluster head et des sommets à tatouer.	56
2.12	a) Sommet avant insertion, b) Sommet après insertion d'un 0.	57
2.13	a) Partition de la base AB en 2 segments, b) Partition de la base AB en 4 segments.	57
2.14	Exemple de décomposition en ondelettes d'une partie d'un maillage.	58
1.1	Différentes formes intérieure de chaussures.	67
1.2	Système d'acquisition des photographies de l'objet 3D.	67
1.3	Schéma général de la chaîne de digitalisation par silhouettes.	68
1.4	Modèle géométrique simple d'une caméra.	70
1.5	Les différents repères utilisés.	71
1.6	a) photo originale, b) seuillage automatique, c) K-means avec $K = 2$, d) différence.	75
1.7	a) Image après seuillage par différence, b) Image après extraction des contours.	76
1.8	a) Exemple de décimation d'un volume de voxels.	77
1.9	Méthode de décimation vue de dessus.	78
1.10	Les 15 configurations de l'algorithme des <i>marching cubes</i>	78
1.11	a) Une forme intérieure réelle avec lignes de style, b) Une forme intérieure numérique avec lignes de style.	79
1.12	Exemple de choix d'une image en fonction de la normale à une face.	80
1.13	Projection d'un triangle de l'objet 3D sur l'image afin d'extraire la texture.	81
1.14	a) Chaussure construite avec un volume de départ de $100 \times 100 \times 200$ voxels, b) Chaussure construite avec un volume de départ de $200 \times 200 \times 400$ voxels, c) construite avec un volume de départ de $300 \times 300 \times 600$ voxels, d) construite avec un volume de départ de $400 \times 400 \times 800$ voxels.	82
1.15	Les images de (a) à (e) représentent les photos de l'horloge prises sur le plateau tournant. Les images de (f) à (j) représentent l'horloge 3D numérique digitalisé à l'aide de notre digitaliseur aux mêmes angles que les photos.	83
1.16	Représentation du maillage de l'horloge.	83

1.17	Les images de (a) à (e) représentent les photos d'un robot prises sur le plateau tournant. Les images de (f) à (j) représentent le robot 3D numérique digitalisée à l'aide de notre digitaliseur aux mêmes angles que les photos.	84
1.18	Représentation du maillage du robot.	85
1.19	Les images de (a) à (e) représentent les photos d'une chaussure prises sur le plateau tournant. Les images de (f) à (j) représentent la chaussure 3D numérique digitalisée à l'aide de notre digitaliseur aux mêmes angles que les photos.	86
1.20	Illustration du problème à la frontière de l'objet.	87
1.21	Possibilité binaire d'interaction entre un voxel et des pixels binaires. . .	87
1.22	a) Projection d'un pixel flou, b) Projection d'un voxel flou.	88
1.23	Exemples de projection d'un voxel sur une image suivant différents angles.	88
1.24	Possibilité floue d'interaction entre un pixel flou et un voxel flou.	88
2.1	Présentation générale de la méthode d'insertion basée sur un ACM. . . .	92
2.2	Construction du graphe de voisinage.	94
2.3	a) Nuage initial de points (453 points), b) Calcul de l'ACM avec l'algorithme de Prim.	96
2.4	a) Nuage de points initial (31088 points), b) Calcul de l'ACM avec l'algorithme de Prim.	97
2.5	Exemple de zones formant des quadrangles sélectionnées pour la synchronisation des données cachées.	98
2.6	a) Zoom d'une zone de l'ACM, b) Zoom de la même zone avec affichage des quadrangles détectés, c) Zone avec l'ACM et les quadrangles.	99
2.7	a) Partie de graphe issu de l'ACM et sélection d'un quadrangle, b) Insertion d'un bit à 0, c) Insertion d'un bit à 1.	100
2.8	a) Zoom d'une partie du maillage avant insertion, b) Zoom de la même partie du maillage après une inversion de toutes les bases communes des triangles composant les quadrangles retenus.	101
2.9	a) Calcul de l'angle A_1 entre les normales N_1 et N_2 , b) Calcul de l'angle A_2 entre les normales N_3 et N_4 après le changement de la base commune des triangles.	102
2.10	a) Triangles T_{123} et T_{234} avant insertion, b) Triangles T_{124} et T_{134} après insertion.	103
2.11	Exemple de calcul de la distance D pour la contrainte de convexité. . . .	104
2.12	Présentation générale de la méthode d'extraction.	105
2.13	a) Maillage triangulé de la chaussure (31088 points, 62168 triangles), b) Visualisation des quadrangles retenus (148 quadrangles) pour un seuil de coplanarité S_c de 20°	107
2.14	a) Maillage triangulé du visage (43039 points, 85145 triangles), b) Visualisation des quadrangles retenus (3313 quadrangles) pour un seuil de coplanarité S_c de 20°	108

2.15	Influence du taux d'insertion sur la capacité avec la méthode basée sur l'ACM.	109
2.16	Pour la méthode basée sur l'ACM, en fonction du seuil S_c , erreurs calculées par : a) La méthode de Hausdorff Max, b) La méthode de Hausdorff RMS.	111
2.17	Influence du bruit sur la détection des quadrangles avec la méthode basée sur l'ACM.	112
2.18	Courbes ROC : sensibilité en fonction de 1-spécificité, pour un seuil de coplanarité $S_c = 10^\circ$ pour la méthode basée sur l'ACM.	113
2.19	Présentation générale de la méthode d'insertion basée sur la projection des quadrangles.	115
2.20	a) Triangles initiaux, b) Triangles après insertion.	116
2.21	Synchronisation des projections des centres des quadrangles sur l'axe clef.	117
2.22	a1, a2, a3) Configuration permettant d'insérer un bit du message à 0, b1, b2, b3) Configuration permettant d'insérer un bit du message à 1.	118
2.23	Présentation générale de la méthode d'extraction proposée.	119
2.24	a) Maillage triangulé de la chaussure (31088 points, 62168 triangles), b) Quadrangles retenus avec la méthode basée sur la projection(5259 quadrangles) pour un seuil de coplanarité S_c de 20°	120
2.25	a) Maillage triangulé du visage (43039 points, 85145 triangles), Quadrangles retenus avec la méthode basée sur la projection (9058 quadrangles) pour un seuil S_c de 20°	121
2.26	Taux d'insertion avec la méthode basée sur la projection.	122
2.27	Pour la méthode basée sur la projection, en fonction du seuil S_c , erreurs calculées par : a) La méthode de Hausdorff Max, b) La méthode de Hausdorff RMS.	123
2.28	Influence du bruit sur la détection des quadrangles avec la méthode basée sur la projection.	124
2.29	Courbes ROC : sensibilité en fonction de 1-spécificité, pour un seuil de coplanarité $S_c = 0.01$ pour la méthode basée sur la projection.	125
2.30	Evolution de la capacité d'insertion en fonction du seuil de coplanarité S_c	126
2.31	Comparaison de l'erreur des deux méthodes d'insertion proposées en fonction du seuil S_c , calculée par la méthode de Hausdorff et par la méthode de Hausdorff RMS.	127
2.32	Comparaison de la robustesse des deux méthodes proposées.	128
2.33	a) Exemple de logo 2D, b) Exemple de logo 3D.	128
2.34	a) Chaussure 3D avec lignes de style cachées, b) Chaussure 3D avec lignes de style visibles.	129
2.35	a) Chaussure 3D avec la texture cachée, b) Chaussure 3D avec la texture visible.	130

