

Sécurité multimédia et objets vidéo 3D

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 20 Mars 2008

pour l'obtention du

Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications –
Paris

(spécialité informatique)

par

Jihane Bennour-Zouaoui

Composition du jury

<i>Président :</i>	Prof. Nicolas Moreau	ENST Paris
<i>Rapporteurs :</i>	Prof. Nouredine Boudriga Prof. William Puech	SUP'COM Tunisie LIRMM
<i>Examineur :</i>	Dr. Séverine Baudry	Thomson R&D
<i>Directeur de thèse :</i>	Prof. Jean-Luc Dugelay	EURECOM

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Je tiens en premier lieu à exprimer toute ma gratitude à mon directeur de thèse Jean-Luc Dugelay pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe image de l'institut Eurecom, pour ses conseils avisés et son soutien tout au long de ma thèse.

Je souhaite remercier vivement tous les membres de mon jury d'avoir accepté la tâche d'évaluer mon travail. Tous mes remerciements à Monsieur Nicolas Moreau d'accepter de présider mon jury de thèse, à Monsieur Noureddine Boudriga et Monsieur William Puech pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être rapporteurs, et à Madame Séverine Baudry d'accepter d'être membre de mon jury en tant qu'examinatrice.

Je remercie également Emmanuel Garcia pour les discussions que nous avons eues les premiers mois de ma thèse et qui ont guidé mes premiers pas dans le domaine du tatouage *3D*.

Une pensée aussi à toutes les personnes avec lesquelles j'ai partagé des discussions enrichissantes lors de conférences, séminaires, réunion, collaboration, etc. En particulier je remercie Patrice Rondao Alface, Nikos Nikolaidis, Dominik Engel, Serap Kirbiz, Hamadi Bouachir ainsi que tous les membres du projet RNRT SEMANTIC 3D.

Je tiens également à exprimer mes remerciements les plus sincères :

- À ma mère, mon soutien indéfectible, pour avoir eu la patience de relire attentivement mon manuscrit et faire la chasse aux fautes d'orthographe.
- À tous mes camarades : Federico, Usman, Caroline, Emilie, Remy, Marco, Moritz, Slim, Ikbal, Benoit, Lamia, Luca, Mohamed, Yasmine, Myriam et tous ceux que je n'aurais pas dû oublier ...
- À tous les membres de ma famille en particulier à mes deux frères, Mehdi et Marwen et à ma belle famille.

Enfin, il importe de mentionner la présence, la patience et la générosité de mon mari, que je remercie également pour son énorme soutien tout au long de ma thèse.

*Je dédie cette thèse
à mes parents*

Table des matières

Table des figures	xi
Liste des tableaux	xv
Avant-propos	1
Introduction générale	3
1 Contexte de la thèse	3
2 Organisation de la thèse	4
Partie I Tatouage et objets 3D	7
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Chapitre 1</div>	
Problématique générale du tatouage numérique 9	
1.1 Introduction	10
1.2 Principe général d'un système de tatouage numérique	10
1.2.1 Le tatouage comme formalisme de communication	11
1.3 Applications	12
1.3.1 Vérification de l'intégrité	13
1.3.2 Protection des droits d'auteur	13
1.3.3 Contrôle de copies illégales	13
1.3.4 Suivi de copies	13
1.3.5 Stéganographie	13
1.3.6 Contrôle d'accès	14
1.3.7 Indexation	14
1.3.8 Contenus augmentés	15

1.4	Protocoles de tatouage	15
1.4.1	Tatouage un/multiple bit	15
1.4.2	Insertion aveugle/informée	15
1.4.3	Extraction aveugle/non aveugle	15
1.5	Évaluation d'un algorithme de tatouage	16
1.5.1	Capacité (payload) ou ratio	16
1.5.2	Visibilité	16
1.5.3	Robustesse	17
1.5.4	Fiabilité du tatouage	18
1.6	Attaques des protocoles de tatouage	19
1.6.1	Le problème de deadlock	20
1.6.2	Utilisation de détecteur de tatouage pour effacer la marque	21
1.6.3	Attaque par collusion	21
1.7	Conclusion	21

Chapitre 2

Modélisation des objets 3D

23

2.1	Introduction	24
2.2	Modèle non structuré	24
2.3	Modèle surfacique	25
2.3.1	Maillage	25
2.3.2	Surface paramétrique	26
2.3.3	Surface implicite	27
2.3.4	Surface de subdivision	28
2.4	Modèle volumique	30
2.4.1	Voxelisation	30
2.4.2	Modèle constructif CSG	31
2.5	Modèle procédural	31
2.5.1	Le système de particules	31
2.5.2	Les fractales	32
2.6	Conclusion	33

Chapitre 3	
Etat de l'art du tatouage d'objets 3D	35

3.1	Introduction	36
3.2	Tatouage d'objets 3D : Principes et applications	36
3.2.1	Motivations et applications du tatouage 3D	36
3.2.2	Compromis classique : robustesse, visibilité et capacité	36
3.3	État de l'art des techniques de tatouage 3D	41
3.3.1	Organisation des données informatiques	42
3.3.2	Modification de la topologie	43
3.3.3	Modification de la géométrie	45
3.3.4	Autres attributs	58
3.4	Conclusion	61

Partie II Contributions **63**

Chapitre 1	
Tatouage 3D et récupération 2D	

1.1	Introduction : Principe et motivation	66
1.2	Vue d'ensemble de l'algorithme	66
1.3	Extraction de la silhouette	67
1.4	Discrétisation de la silhouette	72
1.5	Tatouage	72
1.5.1	Technique aveugle et modèle de projection perspective	73
1.5.2	Technique non-aveugle et modèle de projection parallèle	75
1.5.3	Discussion sur le modèle de rendu	76
1.6	Choix de vues caractéristiques	77
1.7	Conclusion	80

Chapitre 2	
Évaluation des performances	83

2.1	Introduction	84
2.2	Expériences de référence	84
2.2.1	Premier objet	84

2.2.2	Deuxième objet	88
2.3	Expérience dans des conditions plus réalistes	88
2.3.1	Rendu imprécis	89
2.3.2	Recouvrement de marques	90
2.3.3	Projection non-linéaire	92
2.4	Expérience dans un contexte avec attaques	92
2.4.1	Diffusion de l'objet	93
2.4.2	Utilisation de l'objet	95
2.5	Conclusion	97

Chapitre 3	
Tatouage et récupération en 3D	101

3.1	Introduction	102
3.2	Utilisation classique 3D/3D	102
3.3	Évaluation de performance	104
3.3.1	Robustesse vis-à-vis d'une transformation affine	105
3.3.2	Robustesse vis-à-vis d'une simplification de maillage	106
3.3.3	Robustesse face à l'ajout d'un bruit	106
3.3.4	Robustesse vis-à-vis d'une opération de lissage	106
3.3.5	Renumérotation des sommets et triangles	107
3.3.6	Remarques concluantes	107
3.4	Dissimulation de données supplémentaires dans un objet 3D	107
3.4.1	Codage de données dans la silhouette	108
3.4.2	Répartition des données dans le modèle 3D	108
3.4.3	Résultats	109
3.4.4	Remarques concluantes	110
3.5	Conclusion	111

Chapitre 4	
Protocole d'évaluation des techniques de tatouage 3D	113

4.1	Introduction	114
4.2	Protocole d'évaluation	115
4.2.1	Robustesse	115
4.2.2	Visibilité	117

4.2.3	Capacité	118
4.3	Un modèle de paramétrage	118
4.3.1	Objets 3D	118
4.3.2	Score de robustesse	119
4.3.3	Score final	120
4.4	Conclusion	120
Conclusion et perspectives		123
Annexes		127
Annexe A Attaques d'images		
(concours BOWS)		127
A.1	Introduction	127
A.2	Techniques développées	128
A.2.1	Technique de self similarité	128
A.2.2	Techniques basiques de traitement d'images	129
A.3	Résultats	129
A.4	Conclusion	130
Annexe B Publications de l'auteur		131
Index		133
Bibliographie		135

Table des matières

Table des figures

1	<i>Principe du projet Semantic 3D (figure prise de [2])</i>	1
1.1	<i>Nombre de publications en tatouage fourni par INSPEC database, Février 2004.</i>	10
1.2	<i>Schéma de base d'un algorithme de tatouage.</i>	11
1.3	<i>(1) Modèle standard de communication (2) Le tatouage modélisé comme un problème de communication.</i>	12
1.4	<i>Contrôle d'accès d'un document multimédia. Le logo Eurecom est superposée à l'image.</i>	14
1.5	<i>Schéma général du processus d'extraction suivant la notation définie en 1.2.1 (1) Schéma général d'une extraction aveugle (2) Schéma général d'une extraction non aveugle.</i>	16
1.6	<i>Compromis capacité-visibilité-robustesse.</i>	17
1.7	<i>Exemple de graphe T-FA/T-FR.</i>	19
1.8	<i>Courbe ROC.</i>	19
1.9	<i>Le problème de "Deadlock".</i>	20
2.1	<i>Exemple de représentation d'un objet 3D sous forme de nuage de points.</i>	24
2.2	<i>Exemple de représentation sous forme d'un maillage triangulaire. Ce maillage comporte 8 triangles numérotés de 0 à 7, 15 arêtes numérotées de 0 à 14 et 8 sommets numérotés de 0 à 7.</i>	26
2.3	<i>Exemple de représentation sous forme de NURBS : B-Spline monodimensionnelle et surface NURBS.</i>	27
2.4	<i>La fameuse 'trompette de Gabriel' définie par $(x^2 + y^2)z^2 - a^2 = 0$</i>	28
2.5	<i>Subdivision d'un tétraèdre</i>	29
2.6	<i>Les surfaces de subdivision pour des fins d'animation</i>	30
2.7	<i>Exemple de voxelisation de Stanford Bunny.</i>	30
2.8	<i>Exemple de modélisation sous forme d'octree. Chaque cube peut posséder trois valeurs possibles : cube intermédiaire (à diviser en cubes plus petits) cube occupé (présence d'objet) et cube inoccupé (absence d'objet).</i>	31
2.9	<i>Arbre de construction CSG. "Le cube partiellement vidé" est le résultat d'opérations d'union, intersection et différence entre 3 primitives de base : cylindre, sphère et cube.</i>	32

Table des figures

2.10	<i>Modèle procédural : un système de particules rendant un feu (gauche) et une fougère fractale (droite).</i>	32
3.1	<i>Lissage d'un modèle 3D.</i>	40
3.2	<i>Simplification de maillage d'un objet 3D.</i>	40
3.3	<i>Modification de l'ordre des sommets formant un triangle dans un fichier 3D.</i>	43
3.4	<i>Parcours des triangles pour l'insertion du message binaire 10101101011. "1" est inséré pour un parcours contraire aux sens des aiguilles d'une montre et "0" sinon (figure prise de [81]).</i>	44
3.5	<i>Objet 3D tatoué en utilisant la technique PSP (figure prise de [81]).</i> . .	44
3.6	<i>Objet 3D tatoué en utilisant la technique MDP (figure prise de [81]).</i> .	45
3.7	<i>Objet 3D tatoué en utilisant la technique MDP.</i>	45
3.8	<i>La configuration (a) code un bit '1', (b) code un bit '0'.</i>	46
3.9	<i>Exemple de répartition des normales sur la sphère unité Chaque vecteur correspond au centre d'une région. Sa direction correspond à celle de la normale définie au centre de la région. Sa longueur représente la somme des tailles des faces dont la normale appartient à cette région (figure prise de [12]).</i>	48
3.10	<i>Les invariants géométriques $\{a, h\}$ définis pour un triangle du maillage.</i> . .	49
3.11	<i>L'unité de base pour coder de l'information. Le marker (M) est inséré en modifiant légèrement les coordonnées des sommets v_1, v_2 et v_4 de sorte que $\{e_{14}/e_{24}, h_4/e_{12}\} = \{b/a, h/c\}$ avec e_{ij} la distance entre les vertices v_i et v_j. L'indice de position subscript est codé dans la paire $\{e_{02}/e_{01}, h_0/e_{12}\}$ en modifiant légèrement la position du vertice v_0. Les données utiles <i>data1</i> et <i>data2</i> sont codées dans les paires $\{e_{13}/e_{34}, h_3/e_{14}\}$ et $\{e_{45}/e_{25}, h_5/e_{24}\}$ en modifiant légèrement la position des vertices v_3 et v_5 (figure prise de [81]).</i>	50
3.12	<i>Dans chacune des configurations (a) et (b) un bit '1' est inséré.</i>	51
3.13	<i>Calcul de la carte de profondeur d'un modèle 3D.</i>	51
3.14	<i>Cartes de profondeur orthographiques associée au modèle NURBS de visage.</i>	53
3.15	<i>Subdivision de chaque triangle en 4 sous triangles.</i>	56
3.16	<i>Interprétation géométrique des coefficients d'ondelettes (figure prise de [60]).</i>	56
3.17	<i>Géométrie 3D et image de texture associée.</i>	59
1.1	<i>Principe général de l'approche asymétrique 3D/2D de tatouage (insertion en 3D et récupération en 2D).</i>	66
1.2	<i>Schéma général.</i>	68
1.3	<i>Le point p est un point de la silhouette.</i>	69
1.4	<i>Liste des arêtes du maillage et leurs drapeaux associés. F, B désignent respectivement les drapeaux de dos et de face par rapport à la caméra. Ils sont initialisés à 0.</i>	69

1.5	<i>La silhouette est composée par l'ensemble des arêtes $\{1,2\}$, $\{1,4\}$, $\{2,3\}$ et $\{3,4\}$.</i>	70
1.6	<i>La sphère Gaussienne contenant deux arcs $A(E_1)$ et $A(E_2)$ associés respectivement aux arêtes E_1 et E_2 du maillage (figure prise de [16]).</i>	71
1.7	<i>Discrétisation d'un modèle de visage.</i>	72
1.8	<i>Génération de vues 2D à partir du modèle 3D.</i>	79
1.9	<i>Graphe d'aire pour le modèle 3D de tête humaine (droite) et de sphère (gauche). Les vues sont sélectionnées après rotation de 2° suivant l'axe vertical. Pour le modèle de la sphère, les variations sont marginales (il est à noter que les deux figures n'ont pas même échelle).</i>	80
1.10	<i>Vues caractéristiques de 5 modèles différents sélectionnées par notre algorithme basé sur le paramètre aire. De gauche à droite : sphère, main, tête humaine, tournevis et cheval. Ces vues sont obtenues après rotation uniquement suivant axes vertical x.</i>	81
2.1	<i>Modèle de visage humain formé 49132 sommets et 98260 faces (gauche) et zoom sur le maillage 3D du même modèle (droite).</i>	85
2.2	<i>Vues caractéristiques du modèle de visage humain avec leurs silhouettes associées.</i>	85
2.3	<i>Résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f) : Histogramme de corrélation pour les cas de présence et d'absence de marque et leur approximation gaussienne $N(0.8960, 0.0278^2)$ et $N(-0.0015, 0.0681^2)$.</i>	86
2.4	<i>Résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f) : Courbe T-FA et T-FR.</i>	87
2.5	<i>Modèle d'une main formé de 38219 sommets et 76438 faces (gauche) et zoom sur le maillage 3D (droite).</i>	88
2.6	<i>Vues caractéristiques du modèle de main humaine avec leurs silhouettes associées.</i>	89
2.7	<i>Résultats d'extraction à partir du modèle de main (38219 s, 76438 f) : Histogramme de corrélation pour les cas de présence et d'absence de marque et leur approximation gaussienne $N(0.7, 0.04^2)$ et $N(0.0016, 0.06^2)$.</i>	89
2.8	<i>Impact d'un rendu imprécis sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f) : Histogramme de corrélation et leur approximation gaussienne. (a) cas d'une rotation de ($0.1^\circ X$, $0.05^\circ Y$) avec les approximations gaussiennes $N(0.41, 0.0373^2)$ et $N(0.0036, 0.0501^2)$ respectivement pour les cas de présence et d'absence de marque. (b) cas d'une rotation de ($0.2^\circ X$, $0.1^\circ Y$) avec les approximations gaussiennes $N(0.36, 0.0371^2)$ et $N(-0.0035, 0.0468^2)$ respectivement pour les cas de présence et d'absence de marque. (c) cas d'une rotation de ($1^\circ X$, $0.5^\circ Y$) avec les approximations gaussiennes $N(0.32, 0.0433^2)$ et $N(-0.0001, 0.0508^2)$ respectivement pour les cas de présence et d'absence de marque.</i>	91

Table des figures

2.9	<i>Inventaire des attaques pouvant affecter notre procédé asymétrique de tatouage d'objets 3D.</i>	93
2.10	<i>Extraction de la marque après simplification de maillage du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f) tatoué. La clé #100 est la bonne clé. De haut en bas la paire (nombre de sommets, nombre de triangles) est égale à (40002, 80000), (35002, 70000), (30002, 60000), (25002, 50000), (20002, 40000) et (5002, 10000)</i>	96
2.11	<i>Modèle de visage humain original et trois simplifications différentes (gauche) ainsi que la vue 2D correspondante (droite). La paire (nombre de sommets, nombre de triangles) est égale de haut en bas à (49132, 98260), (25002, 50000), (5002, 10000) et (252, 500).</i>	97
3.1	<i>Schéma général de notre approche pour une insertion et récupération en 3D.</i>	103
3.2	<i>Pourcentage des sommets récupérés correctement en fonction de la force de marquage avec et sans discrétisation.</i>	104
3.3	<i>Résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132s, 98260f) : Histogramme de corrélation pour les cas de présence et d'absence de marque et leur approximation gaussienne $N(0.9219, 0.0216^2)$ et $N(8.6 * 10^{-5}, 0.0679^2)$.</i>	105
3.4	<i>Résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132s, 98260f) après simplification du nombre de face de 40%. La clé #100 est celle utilisé pour l'insertion.</i>	106
3.5	<i>Modèle original (gauche) et sa version tatouée après insertion du message 'JIHANE BENNOUR' (droite).</i>	110
3.6	<i>Modèle original (gauche) et sa version tatouée après insertion du message 'JIHANE BENNOUR' (droite).</i>	111
4.1	<i>Schéma général du protocole d'évaluation.</i>	115
4.2	<i>Les cinq modèles sélectionnés pour l'évaluation.</i>	119
A.1	<i>Les trois images à attaquer au concours BOWS.</i>	127
A.2	<i>Technique d'attaque par self similarité (figure prise de [90]).</i>	128

Liste des tableaux

1.1	<i>Applications du tatouage et propriétés associées.</i>	18
2.1	<i>Catalogue des schémas existants de subdivision.</i>	29
2.2	<i>Récapitulatif des différentes modélisations 3D, leurs avantages et inconvénients.</i>	33
3.1	<i>Analogie entre les attaques des techniques de tatouage 3D et 2D.</i>	41
3.2	<i>Récapitulatif des techniques de tatouage 3D</i>	60
2.1	<i>Résultats expérimentaux des performances de détection et leur approximation gaussienne.</i>	87
2.2	<i>Impact d'un rendu imprécis sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f).</i>	90
2.3	<i>Tatouage de plusieurs vues du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f).</i>	90
2.4	<i>Impact d'une projection perspective sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f).</i>	92
2.5	<i>Impact d'un ajout de bruit sur les résultats extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f). On ajoute (Amplitude du bruit)\times(longueur de l'arête) à chaque coordonnées x, y et z du maillage.</i>	94
2.6	<i>Impact de l'opérateur de lissage Umbrella sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f).</i>	95
2.7	<i>Récapitulatif des expériences menées pour l'évaluation de l'approche asymétrique 3D/2D de tatouage.</i>	99
3.1	<i>Impact un ajout de bruit sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f). On ajoute (Amplitude du bruit)\times(longueur de l'arête) aux coordonnées x, y, z du maillage.</i>	107
3.2	<i>Impact de l'opérateur de lissage Umbrella sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f).</i>	107
4.1	<i>Modèles 3D sélectionnés pour l'évaluation.</i>	118

Liste des tableaux

4.2	<i>Tableau des performances en terme de robustesse. Les paramètres de lissage (2, 10, 30) présentent le nombre d'itérations avec l'opérateur de lissage Umbrella. La rotation est suivant les trois axes X,Y et Z . . .</i>	119
A.1	<i>Résultats obtenus au concours BOWS.</i>	130

Avant-propos

Cette thèse s'inscrit d'une part dans le cadre du projet exploratoire SEMANTIC 3D (Service d'Echange et de MANipulation : Tatouage, Indexation et Compression) financé par le Réseau National de Recherche en Télécommunications (RNRT), et d'autre part à la suite des travaux d'Emmanuel Garcia. Ce projet implique les partenaires industriels (TGS, Renault) et académiques (INT, EURECOM, ENIC, LIRIS). Son objectif principal est l'exploration de techniques et d'outils préalables à la réalisation de nouveaux services pour l'exploitation du contenu 3D à travers le Web. La motivation industrielle attendue par Renault est d'assister les techniciens automobiles sur le dépannage (télé-assistance, télé-maintenance) et d'aider à la conception (télé-consultation). La Fig. 1 illustre le principe général du projet Semantic 3D

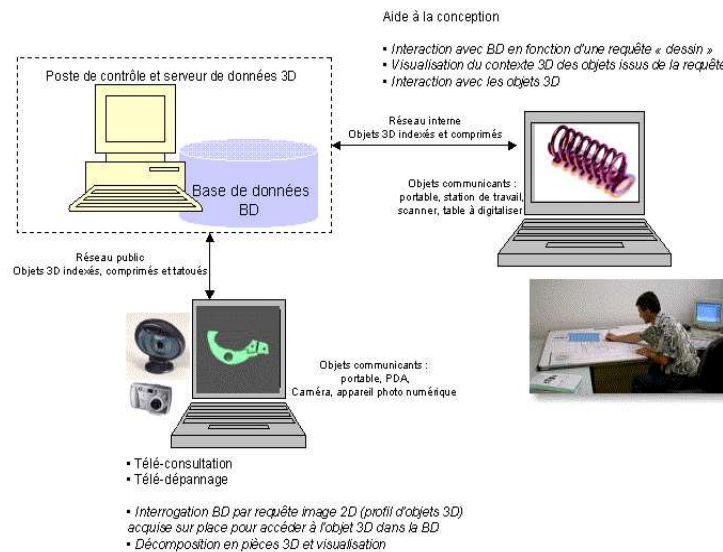


FIG. 1 – Principe du projet Semantic 3D (figure prise de [2])

Ainsi le projet Semantic 3D cherche à :

- Accélérer la transmission et la visualisation des objets 3D via des techniques adaptées de compression de modèles 3D.

- Faciliter l'accès et la recherche des objets *3D* dans la base de données via des méthodes d'indexation appropriées.
- Protéger les données *3D* lors de leur diffusion sur le réseau via des algorithmes de tatouage adéquats.

Nous nous sommes investis avec le partenaire académique INT sur le problème de protection des données lors de leur diffusion.

Introduction générale

1 Contexte de la thèse

Les progrès en imagerie $3D$ ont largement facilité l'utilisation des objets $3D$ dans de nombreuses applications. L'expansion d'internet et la multiplication des réseaux à haut débit font que les objets $3D$ sont de plus en plus présents dans les bases de données distribuées et liées aux services multimédia. Néanmoins, la création de modèles $3D$ reste une activité délicate et laborieuse. L'ampleur de ce phénomène est telle que des questions fondamentales se posent désormais quant à la protection et au contrôle de ces données. On voudrait par exemple vérifier si l'utilisation d'un objet $3D$ est autorisée ou non, ou obtenir des informations supplémentaires sur l'objet (pour l'authentification ou l'indexation), sur le propriétaire (copyright), ou bien encore l'acheteur (pour la non répudiation). Le tatouage $3D$ est très naturellement apparu comme une solution alternative à ces interrogations.

Le tatouage $3D$ consiste à enfouir dans un objet $3D$ une information subliminale afin d'assurer un service de sécurité. Plusieurs techniques ont été développées pour protéger les modèles $3D$ eux mêmes mais aucune étude n'avait été consacrée pour la protection des représentations visuelles des objets $3D$ (avec ou sans texture) et ceci est évidemment très intéressant étant donné qu'il peut être bien plus facile de mettre la main sur une image frauduleuse produite à partir de l'objet $3D$ que l'objet $3D$ lui même.

L'utilisation de représentations visuelles d'objets $3D$ dans des images ou scènes virtuelles envahit de nos jours plusieurs domaines. On les retrouve dans les jeux vidéos où la création de modèles $3D$ est devenue presque systématique, au cinéma où des personnages synthétiques sont insérés dans un décor réel, ou bien encore dans le secteur médical où un chirurgien peut être assisté par un système de vision qui localisera les zones d'intérêt lors d'une opération.

Dans cette thèse nous nous focaliserons principalement sur la protection de l'utilisation des modèles $3D$. L'idée proposée et soumise à l'expérimentation consiste à tatouer un modèle $3D$ via sa/ses silhouette/s apparentes avec l'espoir d'extraire la marque des représentations visuelles de l'objet dans lesquelles l'information de contour tatoué est toujours présente.

2 Organisation de la thèse

Notre travail est divisé en deux grandes parties. Dans la première, le chapitre 1 rappelle les notions de base en tatouage : fragile ou robuste, visible ou invisible, avec ou sans capacité, aveugle ou non-aveugle, etc. Nous présentons également les principales applications et les propriétés associées. En dernier, nous développerons les problématiques et difficultés liées aux techniques de tatouage.

Dans le chapitre 2, nous détaillons les multiples domaines d'applications de modèles $3D$ et la variété avec laquelle de tels objets sont formalisés. Nous cherchons à travers ce chapitre à familiariser le lecteur avec la notion d'objets $3D$ et à montrer la diversité des représentations tridimensionnelles pouvant être utilisées dans le cadre de notre problématique de tatouage $3D$.

Le chapitre 3 est consacré au tatouage $3D$. Nous développons les propriétés associées aux protocoles de tatouage $3D$ et nous dressons un panorama des algorithmes de tatouage $3D$ existants actuellement. Ces techniques modifient les données informatiques, topologiques ou géométriques du modèle $3D$ pour l'insertion de la marque.

La deuxième partie est dédiée à notre contribution. Dans le premier chapitre, nous présentons notre approche asymétrique de tatouage d'objets $3D$ basée sur la silhouette et censée protéger les représentations $2D$ d'objets $3D$. Nous décrivons en premier le principe de l'algorithme dans sa totalité et nous détaillons par la suite les différents modules à savoir l'extraction, la discrétisation et le tatouage de silhouette ainsi qu'une méthode de sélection de vues caractéristiques d'un modèle $3D$.

Dans le deuxième chapitre, nous donnons une indication sur les performances et les limites de notre approche asymétrique $3D/2D$. Nous présentons un ensemble d'expériences d'évaluation. Une première série est opérée dans des conditions idéales, nous informons ainsi sur les limites atteignables par notre algorithme. Une deuxième série d'expériences opère dans des conditions plus réalistes. Pour la troisième série, nous nous plaçons dans un cadre où l'objet $3D$ subit des manipulations avant sa diffusion ou lors de son utilisation dans des images ou scènes virtuelles.

Dans un troisième chapitre, nous avons étudié la possibilité d'appliquer notre approche dans un contexte plus classique à savoir en insertion et récupération $3D$ comme le fait la quasi totalité des algorithmes de tatouage $3D$. L'algorithme a été validé par un ensemble d'expériences d'évaluation.

Dans ce même chapitre, nous proposons une technique de dissimulation d'un message secondaire dans la silhouette du modèle $3D$.

Le dernier chapitre de la thèse est consacré à l'évaluation des techniques de tatouage $3D$. à notre connaissance aucun protocole d'évaluation automatique n'existe actuellement pour les schémas de tatouage $3D$. Il est par conséquent difficile de compa-

rer les méthodes entre elles et de trouver celles adaptées à nos besoins. Nous présentons dans ce chapitre une première tentative de mesure de performances des techniques de tatouage *3D*. A cet effet nous proposons une liste de modèles *3D* et définissons une liste de tests et métriques à appliquer aux méthodes afin d'évaluer les critères habituelles de visibilité, robustesse et capacité. La sortie de notre système d'évaluation est un score final résumant les performances de la méthode de tatouage.

Nous concluons enfin cette thèse en évoquant les applications offertes par notre système de tatouage *3D* ainsi que les nouvelles perspectives potentielles.

Première partie
Tatouage et objets 3D

1

Problématique générale du tatouage numérique

1.1 Introduction

Le "watermarking" (littéralement filigrane du latin *filum*, fil, et *granum*, grain) ou tatouage numérique est une technique relativement récente dans le domaine multimédia (voir Fig. 1.1). Les premiers articles sur le sujet sont apparus au début des années 90 avec l'article de Tanaka [97] et ont concerné essentiellement le tatouage d'images fixes. Très vite de très nombreux laboratoires se sont intéressés à ce domaine. Le nombre de publications a explosé et d'autres supports multimédia ont été concernés comme l'audio, la vidéo, le texte et plus récemment les objets 3D.

Pour la petite histoire, les premières traces du tatouage remontent au XIV^{ème} siècle à Fabriano en Italie. Les ouvriers produisant le papier renommé de cette région eurent l'idée d'insérer le premier filigrane d'une croix grecque à des fins d'authentification de la provenance du papier. Plus d'un siècle plus tard, les papetiers italiens doivent utiliser des filigranes pour l'identification des papiers de qualité.

Les principales notions de tatouage sont reprises dans ce chapitre. Néanmoins pour plus de détails sur le tatouage en général le lecteur peut se référer à [62] [35] [41].

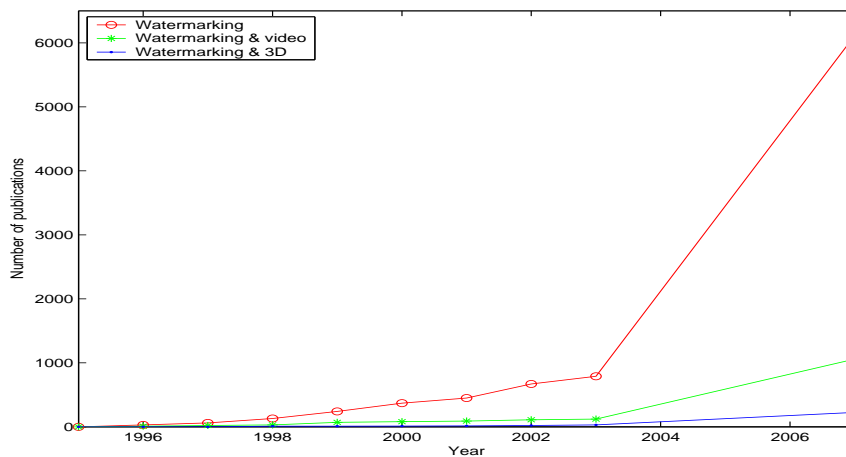


FIG. 1.1 – Nombre de publications en tatouage fourni par INSPEC database, Février 2004.

1.2 Principe général d'un système de tatouage numérique

Le principe général du tatouage, que l'on peut sommairement décrire à l'aide de la Fig. 1.2 consiste à enfouir dans un document numérique une information subliminale (i.e. invisible ou inaudible suivant la nature du support) modulée par une clé secrète. Il est par la suite possible, même si le document a subi des manipulations de natures variées, de vérifier si un message a été inséré dans le document multimédia ou de récupérer le message enfoui. Un système de tatouage est donc composé de deux modules principaux, un pour l'insertion de la marque et un pour son extraction.

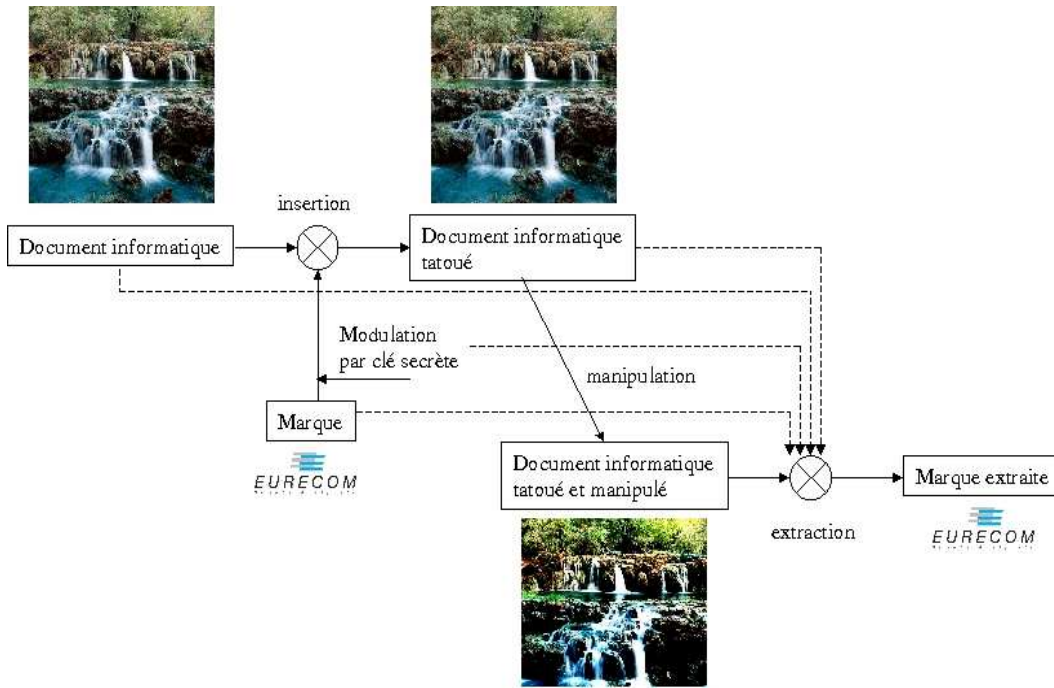


FIG. 1.2 – Schéma de base d'un algorithme de tatouage.

1.2.1 Le tatouage comme formalisme de communication

Le tatouage a souvent été modélisé comme un problème de communication [34], le canal de communication est le média, le message à transmettre est la marque et les pertes sur le canal modélisent les attaques (cf. Fig. 1.3). Nous décrivons ci-dessous le processus d'insertion et d'extraction suivant ce formalisme.

Insertion

On cherche à protéger un média D_o , pour cela on définit la fonction d'extraction e qui fournit un vecteur de réels de taille N_v à partir d'un document D_o et la fonction t pour une éventuelle transformée (ondelette, Fourier, etc).

$$x = t(e(D_o)) \quad (1.1)$$

Le signal de tatouage w est alors construit en modulant le signal à insérer $m \in \{0, 1\}^{N_m}$ par une clé secrète $k \in \mathcal{N}$ via une fonction de tatouage W . Cette fonction peut éventuellement dépendre du vecteur original $x \in \mathcal{R}^{N_v}$ dans le cas d'une insertion informée (cf. section 1.4).

$$w = W(k, m, x) \quad (1.2)$$

On utilise ensuite une fonction de mélange F qui mêle le signal de tatouage w au signal original x pour avoir le signal tatoué x_w et ce en tenant compte de la force de

marquage $p \in \mathcal{R}$

$$x_w = F(x, w, p) \quad (1.3)$$

Le document tatoué D_w est alors obtenu à partir de x_w en inversant l'équation 1.1.

$$D_w = e^{-1}(t^{-1}(x_w)) \quad (1.4)$$

Décodage de la marque

Le document D_w est ensuite diffusé sur le réseau. Il peut éventuellement subir des manipulations. On dénote le document manipulé par D_a et l'ensemble des attaques par la fonction a .

$$D_a = a(D_w) \quad (1.5)$$

On extrait de la même manière que dans l'équation 1.1 le vecteur $x' \in \mathcal{R}^{N_v}$ supposé porteur du signal de tatouage.

$$x' = t(e(D_a)) \quad (1.6)$$

et on décode à l'aide de la clef k le tatouage afin d'avoir le message estimé m' .

$$m' = d(x', k) \quad (1.7)$$

Si le tatouage est décodé correctement $m' = m$

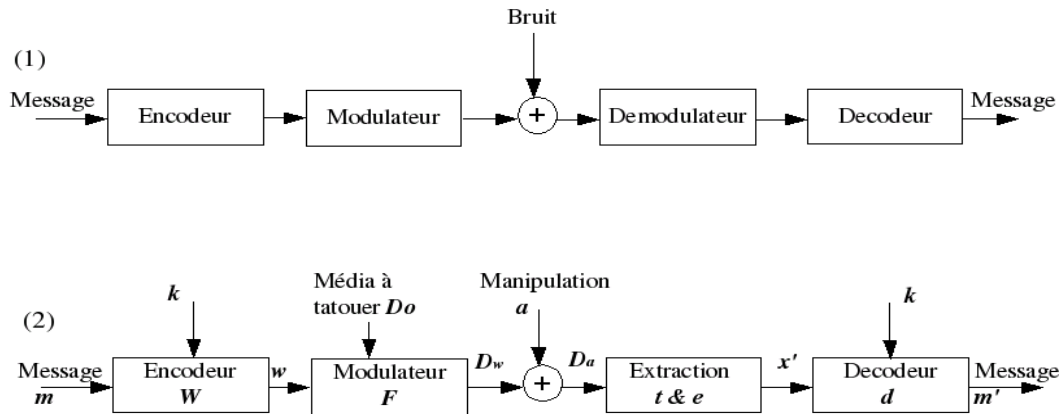


FIG. 1.3 – (1) Modèle standard de communication (2) Le tatouage modélisé comme un problème de communication.

1.3 Applications

Parmi les applications possibles du tatouage on peut citer :

1.3.1 Vérification de l'intégrité

La vérification de l'intégrité d'un document numérique vise à s'assurer que le contenu reçu est conforme à l'original [108] [111]. On viendra alors insérer un tatouage volontairement fragile suivant deux protocoles :

- Insérer dans le document à tatouer une mire de référence. Une manipulation du document est alors détectée par une perte ou une déformation partielle de la mire.
- Extraire des caractéristiques du document à tatouer et les dissimuler dans le document lui-même. La vérification consiste à comparer les caractéristiques du document à tester avec celles de référence dissimulées sous forme de marquage.

1.3.2 Protection des droits d'auteur

Le tatouage peut être défini comme le procédé de référence permettant d'assurer la sécurité et la circulation d'un document protégé par le droit d'auteur [4] [106]. L'objectif est de permettre d'identifier le document, de connaître le propriétaire et de localiser les différents utilisateurs, et ce même si le document concerné a subi des manipulations malveillantes ou non.

1.3.3 Contrôle de copies illégales

Les données numériques contrairement aux analogiques peuvent être recopiées à l'identique sans perte de qualité. On peut donc imaginer le scénario où une personne malintentionnée possède légalement un document numérique et redistribue illégalement des copies de ce document. Certaines instances proposent d'utiliser le tatouage pour limiter l'ampleur d'un tel phénomène [46]. La solution, peut être dans le cas de systèmes DVD [71] par exemple, d'insérer un filigrane numérique qui indiquera si la vidéo peut être lue et/ou copiée.

1.3.4 Suivi de copies

Dans le paragraphe précédent, le tatouage a été utilisé comme solution pour contrôler le nombre de copies d'un document multimédia. On peut également imaginer une utilisation du tatouage pour un suivi de copies [97]. Un identifiant du destinataire (ou "fingerprint") peut être dissimulé dans le document multimédia afin de pouvoir remonter à la source en cas d'utilisation illégale.

1.3.5 Stéganographie

Le tatouage peut être défini comme un moyen pour cacher de l'information dans un document numérique [24]. Il s'agit de cacher un message secondaire dans un message primaire. Le message primaire reste lisible de tous, tandis que le message secondaire n'est lisible que par une ou plusieurs personnes propriétaires d'une information secrète.

Cette technique peut se révéler utile si on imagine un scénario où Alice et Bob échangent des informations sous le regard d'un inconnu Philippe. Philippe regarde ce qui transite sur le canal de communications et peut à tout moment interrompre la communication. Si Alice et Bob échangent des données cryptées, Philippe peut être vexé et stoppera la conversation. Par contre, si Alice et Bob échangent des informations cachées dans un contenu anodin, Philippe ne peut même pas s'en rendre compte.

1.3.6 Contrôle d'accès

Une autre application du tatouage est d'ôter tout intérêt commercial du document numérique. Une marque peut être superposée au document multimédia (voir Fig. 1.4) et seules les personnes ayant le droit d'accès peuvent inverser le processus et récupérer le document original. La différence avec la cryptographie est que la marque superposée peut porter des données supplémentaires sur le document comme l'adresse où le commander, le nom de la société, etc.



FIG. 1.4 – Contrôle d'accès d'un document multimédia. Le logo Eurecom est superposée à l'image.

1.3.7 Indexation

On peut imaginer utiliser le tatouage pour décrire la sémantique d'un contenu et faciliter par la suite sa recherche dans une base de données multimédia. Le principal avantage de cette technique par rapport à une indexation classique est qu'on peut assurer une robustesse à certaines manipulations principalement aux changements de format et permettre alors une gestion plus souple des contenus multimédia en ne privilégiant pas un standard de représentation plus qu'un autre.

1.3.8 Contenus augmentés

Le tatouage peut également être utilisé pour augmenter les possibilités d'utilisation d'un média [58]. Par exemple insérer la carte de profondeur d'un modèle 3D dans son image de texture permet à tout utilisateur de visualiser l'image de texture et à celui qui détient le décodeur approprié de voir le modèle en 3D [49].

1.4 Protocoles de tatouage

Les protocoles de tatouage se distinguent les uns des autres essentiellement par les points suivants :

1.4.1 Tatouage un/multiple bit

La notion de tatouage "un bit" fait référence à un protocole de tatouage où l'extraction consiste à vérifier qu'un message donné est présent ou pas dans le document. Le résultat de l'extraction est une réponse binaire *oui/non* quant à la présence de la marque. Les techniques de tatouage "un bit" sont aussi appelées techniques de tatouage "sans capacité".

Dans les systèmes de tatouage "multiple bit" aussi appelés "avec capacité", on cherche non seulement à vérifier si une marque est présente ou pas mais aussi quelle marque. Le résultat de l'extraction est le message lui-même, inconnu à priori.

1.4.2 Insertion aveugle/informée

La notion d'insertion "aveugle" fait référence à un protocole de tatouage où le document à tatouer est assimilé à un bruit ou à une interférence. Dans la majorité des cas, ces techniques utilisent la connaissance statistique du signal à tatouer.

L'insertion "informée" exploite la connaissance non seulement des données statistiques du document à tatouer mais aussi du document lui-même. Le tatoueur utilise ces données afin d'améliorer les performances de détection.

1.4.3 Extraction aveugle/non aveugle

Il existe deux modes pour l'extraction de la marque : le mode non aveugle et le mode aveugle suivant qu'on a besoin ou pas du modèle original (tatoué ou pas) pour l'extraction.

- Extraction non aveugle (ou tatouage privé) : le récepteur dispose du document numérique multimédia à vérifier ainsi que du document original. Ce mode suppose bien évidemment que le document original soit disponible au moment de l'extraction ce qui limite les domaines d'applications. Ce contexte n'est pas adapté par exemple pour une recherche automatique sur Internet de copies illégales d'un document.
- Extraction aveugle (ou tatouage public) : la seule donnée nécessaire à l'extraction est la clé secrète du marquage. C'est le mode d'extraction le plus intéressant

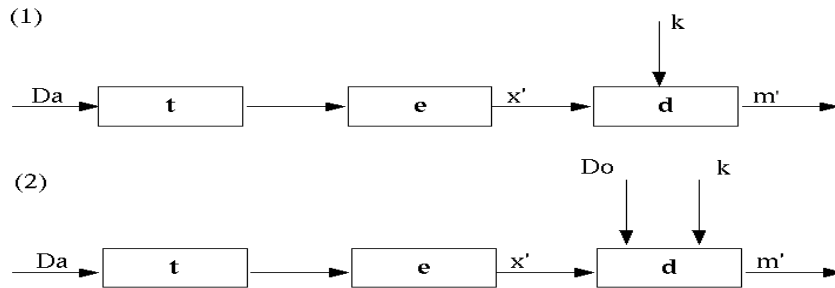


FIG. 1.5 – Schéma général du processus d'extraction suivant la notation définie en 1.2.1
 (1) Schéma général d'une extraction aveugle (2) Schéma général d'une extraction non aveugle.

mais également le plus difficile à mettre en œuvre.

Le schéma général d'une extraction aveugle et non aveugle est illustré sur la figure 1.5 en utilisant la notation définie dans la section 1.2.1.

1.5 Évaluation d'un algorithme de tatouage

Tout algorithme et en particulier ceux destinés à une application de sécurité doit faire l'objet d'une évaluation de performance. Dans le cas des techniques de tatouage, les principales contraintes à prendre en compte pour l'évaluation sont les suivantes :

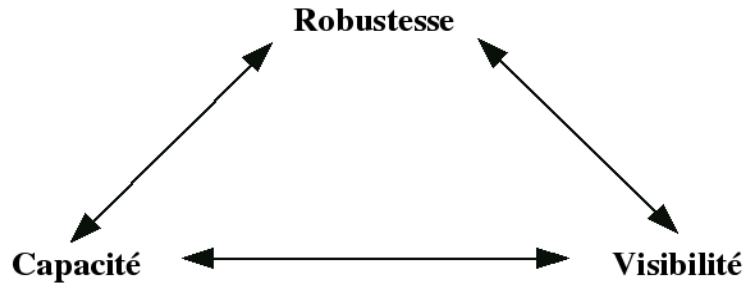
1.5.1 Capacité (payload) ou ratio

La capacité est la quantité d'information qu'on peut dissimuler dans le support multimédia (audio, vidéo, image ou objet 3D) à protéger. Le nombre de bits qu'on peut insérer est étroitement lié à la nature du support et à l'application visée. Ordinairement 16 à 64 bits sont suffisants pour assurer un service de protection des droits d'auteur mais pas pour cacher des données explicites comme le logo d'une société ou pour assurer l'intégrité du document.

La capacité d'un algorithme de tatouage est souvent mesurée comme le rapport entre le volume d'information du tatouage et le volume d'information du média sur lequel s'applique le tatouage.

1.5.2 Visibilité

L'impact visuel du marquage (distorsion) doit être imperceptible afin que le document marqué reste fidèle à l'original. De nombreux algorithmes effectuent des tests psycho visuels (HVS) pour évaluer la distorsion introduite par le marquage. D'autres techniques utilisent des mesures de transparence déjà définies comme le rapport signal

FIG. 1.6 – *Compromis capacité-visibilité-robustesse.*

sur bruit (PSNR - Peak Signal to Noise Ratio), l'indice universel de qualité dans le cas d'images fixes (UIQI - Universal Image Quality Index) ou la distorsion de Hausdorff dans le cas d'objets 3D.

1.5.3 Robustesse

La robustesse est la capacité du système à résister aux manipulations. C'est un élément essentiel à prendre en considération lors de la conception d'un algorithme de tatouage dans la mesure où un document multimédia subit très probablement des manipulations bienveillantes ou non.

On appelle attaques bienveillantes celles opérées par un utilisateur de bonne foi. Elles regroupent les attaques de compression, de rotation, de translation, de changement d'échelle (zoom), de conversion de format, etc. Les attaques malveillantes, quant à elles, elles sont opérées par un utilisateur qui tente de retirer la marque ou tout simplement d'empêcher son extraction. Ces attaques et manipulations sont détaillées pour le cas d'objets 3D dans la section 3.2.2.

Afin d'évaluer la robustesse d'un algorithme de tatouage, quelques protocoles existent déjà dans le cas d'images fixes. On peut citer principalement Stimark [96], Chechmark [29], Optimark [87] and Certimark [28]. Pour les autres supports multimédia (vidéo, objet 3D), on note une négligence de ce point (évaluation de la robustesse) qui est due à la jeunesse du domaine mais aussi à la difficulté de procéder à une évaluation rigoureuse.

Il est facile de noter que ces trois critères (capacité, visibilité et robustesse) sont antinomiques. Une augmentation par exemple de la force de marquage assure une meilleure robustesse ; en contre partie la distorsion introduite est plus importante. On parle dans ce cas de compromis robustesse-visibilité-capacité comme illustré sur la figure Fig. 1.6.

Le tatoueur doit choisir en fonction de l'application visée le jeu de paramètres adéquats. Il serait absurde, par exemple, de concevoir un algorithme de tatouage robuste pour assurer l'intégrité d'un document ; alors que la fragilité du tatouage est dans ce

cas exploitée pour vérifier si un document est intègre ou non.

Nous dressons un tableau récapitulatif (Tab. 1.1) reprenant les différentes applications du tatouage (développées dans la section 1.3) et les propriétés requises pour remplir ces services en terme de visibilité, robustesse et capacité.

	Invisibilité	Robustesse	Capacité
Vérification de l'intégrité	importante	faible	centaines de bits
Protection des droits d'auteur	importante	importante	64 à 128 bits
Contrôle de copies illégales	importante	importante	quelques bits
Suivie de copies	importante	importante	dizaine de bits
Stéganographie	importante	inutile	très variable
Contrôle d'accès	faible	moyenne	centaines de bits
Indexation	importante	moyenne	centaines de bits
Capacité augmentée	importante	faible	très variable

TAB. 1.1 – Applications du tatouage et propriétés associées.

1.5.4 Fiabilité du tatouage

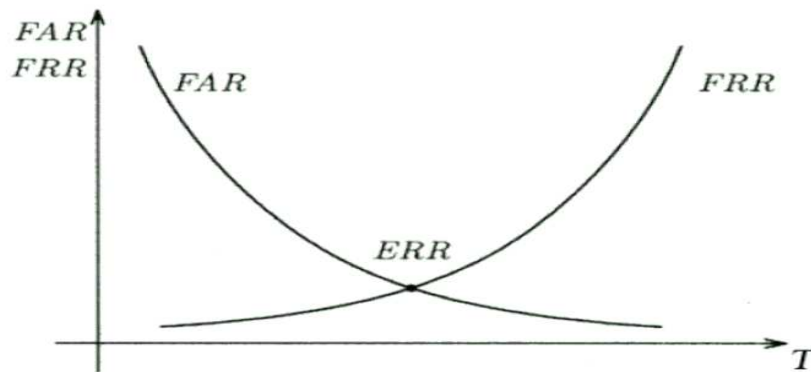
La fiabilité d'un système de tatouage "sans capacité" est mesurée par le taux de fausses alarmes dont il existe deux types :

- Le taux de faux rejet (False Rejection Rate FRR) : la détection de la marque est négative (le média ne contient pas de marque) alors qu'elle y est présente.
- Le taux de fausse acceptation (False Acceptance Rate FAR) : la détection de la marque est positive (le média contient la marque) alors qu'elle n'est pas présente.

Ces deux taux sont estimés en fonction du seuil de sécurité T . Plus la valeur du seuil est grande plus il y a de faux rejets et moins de fausses acceptations et inversement. La figure 1.7 montre la dépendance des taux de fausses acceptations (FAR) et de faux rejets (FRR) au seuil de sécurité T .

La liaison entre le FAR et le FRR pour différentes valeurs de seuil peut se traduire par les courbes dites ROC (Receiver Operating Characteristics) [42] avec en abscisses et ordonnées respectivement le taux de fausses acceptations et de faux rejets (voir figure 1.8). Il en résulte que l'on peut diminuer le risque de fausse acceptation que si on augmente le risque de faux rejet.

Un des points clés du graphe ROC est le taux d'égale erreur EER (Equal Error Rate). Il correspond au point $FAR = FRR$, c'est à dire géométriquement à l'intersection de la courbe ROC avec la première bissectrice. Le point d'égale erreur EER est souvent utilisé comme point de comparaison entre différents systèmes. Plus la valeur du EER est faible plus le système est fiable.

FIG. 1.7 – Exemple de graphe T -FA/ T -FR.

Dans le cas de techniques de tatouage "avec capacité" on peut éventuellement avoir une indication sur la fiabilité du message extrait. Cette fiabilité peut être mesurée en terme de taux d'erreur binaire sur le message extrait. Classiquement on trace un diagramme de BER (Bit Error Rate) en fonction de la taille de la marque en bits. Il est à noter qu'on peut améliorer la fiabilité en diminuant la capacité, par exemple avec l'utilisation des codes correcteurs.

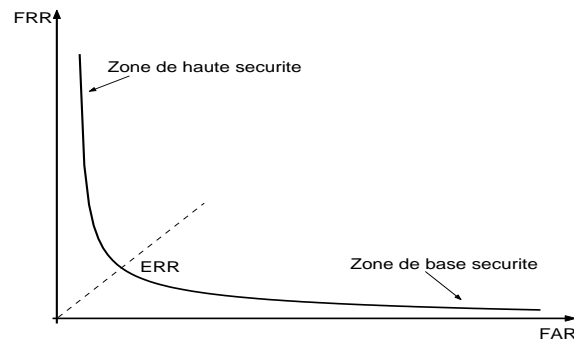


FIG. 1.8 – Courbe ROC.

1.6 Attaques des protocoles de tatouage

Les attaques de protocoles se différencient de celles évoquées dans la session 1.5.3 dans la mesure où elles ne sont pas opérées par un utilisateur qui tente de retirer la marque par des manipulations du média. Ces attaques s'en prennent directement au protocole de tatouage. Nous présentons ici trois de ces attaques qui peuvent mettre à défaut une technique de tatouage. Pour plus de détails on peut se référer à l'article

de Craver et al. [36] qui ont été les premiers à proposer ce type d'attaques.

1.6.1 Le problème de deadlock

Considérons le scénario où Alice a un document I , elle le marque avec une signature A afin de générer le document tatoué $I' = I + A$ qu'elle rend public. Une personne malveillante Bob, connaissant l'algorithme utilisé pour l'insertion de la marque, crée un document "original" $I' - B = I + A - B$ et prétend que $I + A$ contient la marque B imprimé sur l'"original" $I + A - B$. Dans ce cas Alice peut montrer que le supposé original de Bob $I + A - B$ contient sa marque A (la marque $-B$ joue alors le rôle de bruit auquel l'algorithme de tatouage est supposé robuste) mais Bob aussi peut prétendre que l'original d'Alice I contient sa marque B par rapport à son faux original $I + A - B$ (la marque A joue alors le rôle de bruit auquel l'algorithme de tatouage est supposé robuste). Ceci conduit à une situation indécidable ou "deadlock" comme illustrée sur la figure 1.9. Une solution possible pour résoudre ce problème est de déposer l'original à une tierce personne de confiance. Celui qui le lui dépose le premier est alors réputé le détenteur du véritable original.

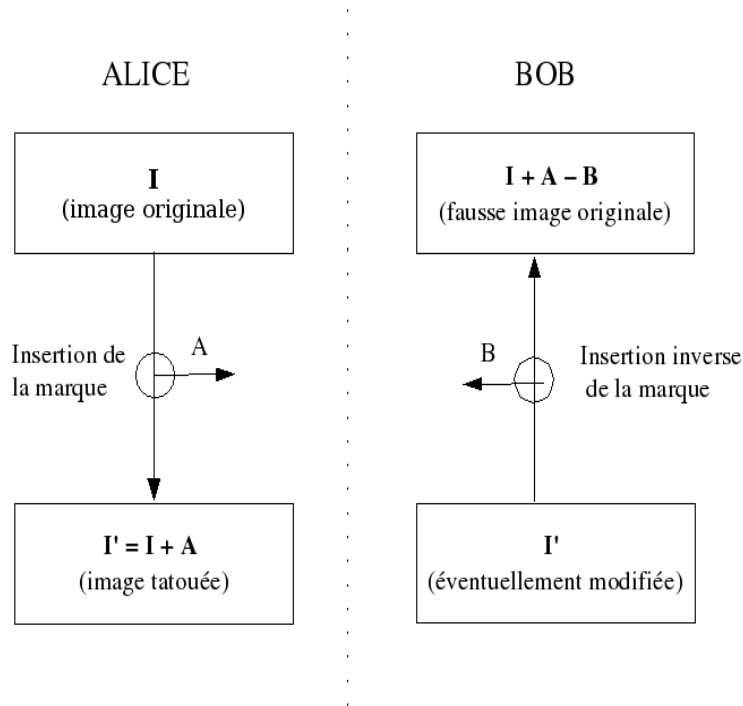


FIG. 1.9 – Le problème de "Deadlock".

1.6.2 Utilisation de détecteur de tatouage pour effacer la marque

On peut imaginer qu'une personne possède un détecteur de tatouage qui indique si un document porte ou non une marque. Il peut alors modifier pixel par pixel, mot par mot, triangle par triangle, en fonction du type de document pour repérer les éléments qui diminuent plus la détection du tatouage tout en conservant l'utilité du document. Il peut ainsi reconstruire l'image originale. Cette procédure peut mettre en danger les techniques de tatouage mais elle reste coûteuse en terme de complexité et temps de calcul. L'attaque "Oracle" [57] [68] est l'une des stratégies génériques qui tentent d'effacer le tatouage.

1.6.3 Attaque par collusion

On peut imaginer que plusieurs personnes détenteurs d'un même document tatoué différemment (typiquement pour un service de suivi de copies) s'associent pour rendre le tatouage inopérant. Une idée parmi d'autres est de créer une mosaïque à partir des versions tatouées. Le détecteur de tatouage peut dans ce cas déclarer que la mosaïque constituée ne contient pas de marquage ou qu'elle contient plusieurs marques et dans les deux cas le processus d'attribution des droits est faussé.

Un autre scénario est qu'une ou plusieurs personnes disposent de plusieurs documents tatoués avec le même message (typiquement pour un service de droits d'auteur). Une estimation de la marque est dans ce cas possible. Une idée simple est de moyenniser les différents documents. La contribution de chaque document tend vers zéro alors que seul ressort le message de tatouage qu'on peut par la suite retirer de chaque document.

1.7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de parcourir les notions de bases en tatouage, d'apprécier l'étendu d'applications. Cette diversité dans les applications a suscité une diversité dans les techniques. Plusieurs protocoles ont été proposés répondant à des motivations variées allant de la protection des droits d'auteur à la vérification de l'intégrité du média. Il est à noter que toutes ces techniques doivent obéir au compromis capacité-visibilité-robustesse. Nous avons également souligné que pour évaluer les techniques de tatouage, quelques protocoles existent déjà dans le cas d'images fixes. Pour les autres média ce point a été relativement négligé ce qu'on a justifié par la difficulté de la tâche et la jeunesse du domaine.

2

Modélisation des objets 3D

2.1 Introduction

Après avoir rappelé au chapitre 1 les notions de bases en tatouage, les chapitres suivants seront dédiés au tatouage d'objets 3D. Il nous semble légitime avant de parler de tatouage d'objets 3D, de préciser au préalable les principaux domaines d'applications et la variété avec laquelle de tels objets sont formalisés.

Le but de la liste que nous établissons à présent n'est pas d'être exhaustive mais de familiariser le lecteur avec la notion d'objets 3D et de montrer la diversité des représentations tridimensionnelles pouvant être utilisées dans le cadre de notre problématique de tatouage 3D.

Nous avons distingué quatre classes principales de modèles : modèles non structurés, modèles surfaciques, modèles volumiques et modèles procéduraux. Les algorithmes de tatouage peuvent être appliqués à n'importe lequel de ces modèles.

2.2 Modèle non structuré

Les nuages de points sont l'exemple le plus populaire appartenant à cette classe d'objets 3D. Ce sont des ensembles finis de points 3D non connectés entre eux comme illustré sur la figure Fig. 2.1. Ils sont généralement obtenus par digitalisation manuelle, à l'aide d'un scanner ou par échantillonnage d'un autre modèle. Ils présentent l'avantage d'être "naturels" (i.e. conception atomiste) et simple à afficher. Néanmoins ce modèle possède plusieurs limitations : il s'avère coûteux en terme de mémoire et difficilement éditable.

Soupe de polygones (ensemble de polygones défini indépendamment les uns des autres) est un autre exemple de modèle 3D non structuré.

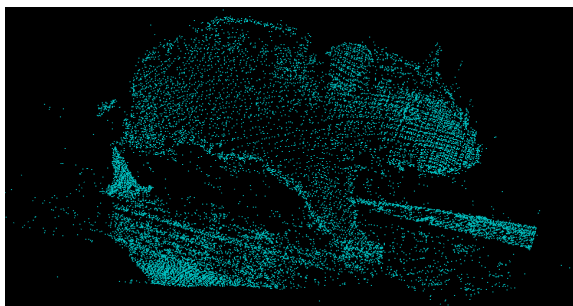


FIG. 2.1 – Exemple de représentation d'un objet 3D sous forme de nuage de points.

2.3 Modèle surfacique

Une surface d'un point de vue mathématique est une deux variété. C'est un espace topologique non vide où tout point possède un voisinage homéomorphe¹ à un ouvert de \mathcal{R}^2 .

Nous détaillons ici quatre types de modèles surfaciques : les maillages (section 2.3.1), les surfaces paramétriques (section 2.3.2), les surfaces implicites (section 2.3.3) et les surfaces de subdivision (section 2.3.4).

2.3.1 Maillage

Ce modèle est de loin la manière la plus courante de représenter un objet $3D$ dans le monde de l'informatique graphique. Il s'agit de donner un ensemble de sommets ainsi qu'un ensemble d'indices de sommets qui forment les polygones (les plus utilisés sont des triangles, on parle alors de maillage triangulaire).

Un maillage polygonal M contient trois types d'éléments : les sommets s , les arêtes a et les faces f (voir Fig. 2.2) et est défini par deux types de données : la géométrie et la connectivité. La géométrie code les coordonnées (x, y, z) des sommets et la connectivité établit des relations entre les différents éléments du maillage.

Il est à noter que deux sommets s_i et s_j sont dits adjacents s'il existe une arête $a(i, j) \in M$ qui relie ces deux points. Les sommets adjacents au sommet s_i sont appelés voisinage de s_i . On appelle valence ou degré d'un sommet s_i le cardinal de son voisinage.

La matrice d'adjacence A représente la connectivité du maillage M

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } a(i, j) \in M \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On dit qu'un maillage est une variété ou manifold si chacune de ses arêtes est partagée par une ou deux faces. À une variété, on associe généralement sa caractéristique d'Euler Poincaré notée χ

$$\chi = S - A + F \quad (2.1)$$

avec S , A et F respectivement le nombre de sommets, d'arêtes et de faces du maillage. Une sphère et un tore ont respectivement leur caractéristique d'Euler Poincaré égale à 2 et 0. Cette relation d'Euler Poincaré est liée aux caractéristiques topologiques de la surface par l'équation :

$$\chi = S - A + F = 2(c - g) - b \quad (2.2)$$

avec g le genre de la surface, c le nombre de composantes connexes et b le nombre de bords. Le genre d'une surface est le nombre maximum de courbes fermées simples sans points communs que l'on peut tracer à l'intérieur de cette surface sans la déconnecter. Une sphère et un tore sont respectivement de genre 0 et 1.

¹Deux espaces topologiques sont dits homéomorphes s'il existe une bijection continue de l'un dans l'autre dont la réciproque est continue.

La popularité de ce modèle de représentation vient de sa simplicité algébrique. De plus il est relativement aisé de convertir n'importe quelle autre représentation en maillage. Néanmoins, ce modèle présente l'inconvénient de ne pouvoir décrire de manière parfaite que les polyèdres et de nécessiter un volume de données important pour approximer correctement des surfaces courbes.

La majorité des tatoueurs ont fait le choix d'utiliser cette modélisation d'objets pour leurs algorithmes de tatouage.

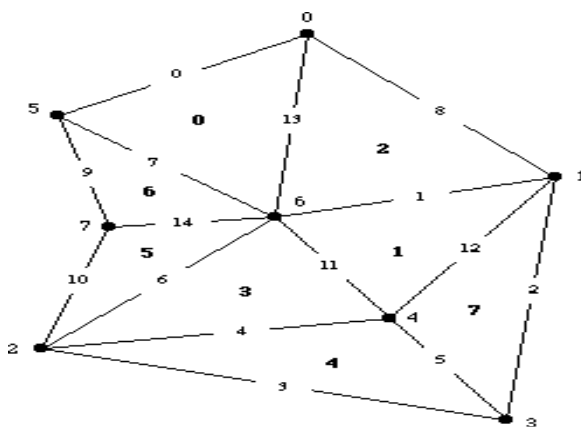


FIG. 2.2 – Exemple de représentation sous forme d'un maillage triangulaire. Ce maillage comporte 8 triangles numérotés de 0 à 7, 15 arêtes numérotées de 0 à 14 et 8 sommets numérotés de 0 à 7.

2.3.2 Surface paramétrique

La deuxième manière de définir une surface est par une présentation paramétrique de la forme

$$M = \begin{cases} f_x(u, v) \\ f_y(u, v) \\ f_z(u, v) \end{cases}$$

avec u et v les variables paramétriques et f_x , f_y et f_z des fonctions de $\mathcal{R}^2 \rightarrow \mathcal{R}$.

Les représentations paramétriques sont souvent utilisées pour modéliser des morceaux de surfaces courbes. Il s'agit des *NURBS* (Non Uniform Rational B-Spline). Nous allons nous intéresser à cette classe de surfaces paramétriques très utilisée dans le domaine de la *CAO/CFAO* (Conception Assistée par Ordinateur/Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur).

Pour plus de détails sur les surfaces paramétriques le lecteur peut se référer à [43].

La construction des surfaces *NURBS* utilise des B-Splines monodimensionnelles (voir Fig. 2.3). Nous rappelons comment les calculer récursivement.

Soit $U = \{t_0, t_1, \dots, t_n\}$ une suite (non strictement) croissante appelée vecteur de nœuds. Les fonctions B-Splines $B_{i,k}$ sont définies par récurrence à partir du vecteur

des nœuds par :

$$B_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } t_i \leq u < t_{i+1} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

et

$$B_{i,k}(u) = \frac{u - t_i}{t_{i+k} - t_i} * B_{i,k-1}(u) + \frac{t_{i+k+1} - u}{t_{i+k+1} - t_{i+1}} * B_{i+1,k-1}(u). \quad (2.3)$$

La construction de la surface nécessite la donnée d'un ensemble P de points de contrôle pondérés par un vecteur w de poids afin de paramétrer la combinaison des B -Splines d'ordre k et l . La surface NURBS est alors définie par :

$$S_{NURBS}(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} * R_{i,k,j,l}(u, v) \quad (2.4)$$

où

$$R_{i,k,j,l}(u, v) = \frac{w_{i,j} * B_{i,k}(u) * B_{j,l}(v)}{\sum_{r=0}^n \sum_{s=0}^m w_{r,s} * B_{r,k}(u) * B_{s,l}(v)} \quad (2.5)$$

L'atout majeur des surfaces NURBS réside dans l'utilisation des points de contrôle qui permettent d'avoir une appréciation intuitive et précise de la forme à modéliser, c'est en particulier pour cette raison que de telles surfaces sont souvent utilisées en *CAO/CFAO*. Une possible limitation de ce formalisme est le nombre important de paramètres à régler pour la construction d'objets de topologie complexe.

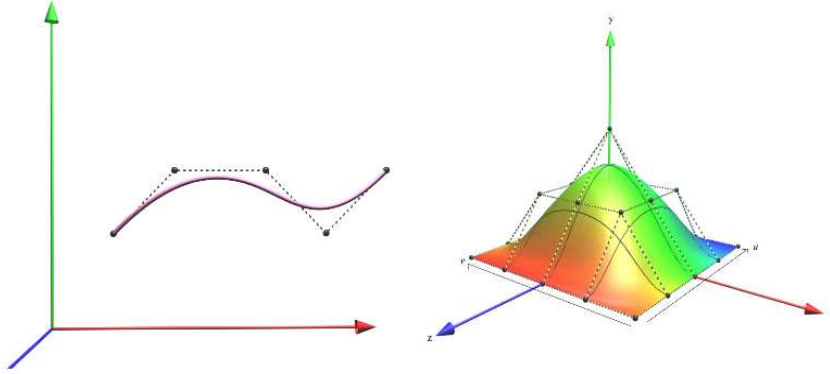


FIG. 2.3 – Exemple de représentation sous forme de NURBS : B -Spline monodimensionnelle et surface NURBS.

2.3.3 Surface implicite

Contrairement aux modèles paramétriques qui explicitent les coordonnées des points, le formalisme implicite définit une surface comme un ensemble de points vérifiant l'équation $F(x, y, z) = 0$ où F est une fonction de \mathcal{R}^2 dans \mathcal{R} souvent désignée par fonction implicite, champ scalaire ou encore fonction potentielle. C'est par exemple

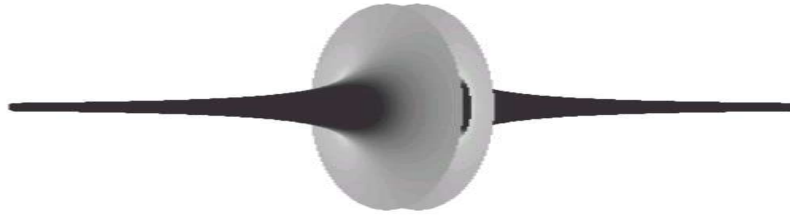


FIG. 2.4 – La fameuse 'trompette de Gabriel' définie par $(x^2 + y^2)z^2 - a^2 = 0$

le cas d'un plan défini par une équation du type $ax + by + cz + d = 0$ où (a, b, c) représentent les coordonnées du vecteur normal au plan. C'est aussi le cas d'une sphère définie par $(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 - R^2 = 0$ où (a, b, c) sont les coordonnées du centre et R le rayon, ou encore le cas de la fameuse *trompette de Gabriel* (voir Fig. 2.4) définie $(x^2 + y^2)z^2 - a^2 = 0$ avec x, y et z les coordonnées cartésiennes d'un point P de la trompette et a non nul.

Grâce à cette formulation, la propriété principale des surfaces implicites est la classification d'un point : pour un point P , il est possible de déterminer s'il est à l'intérieur, à l'extérieur ou sur la surface en fonction du signe de $F(P)$.

$$\begin{cases} F(P) > 0 & P \text{ est à l'extérieur de l'objet modélisé} \\ F(P) = 0 & P \text{ est sur la surface de l'objet modélisé} \\ F(P) < 0 & P \text{ est à l'intérieur de l'objet modélisé} \end{cases}$$

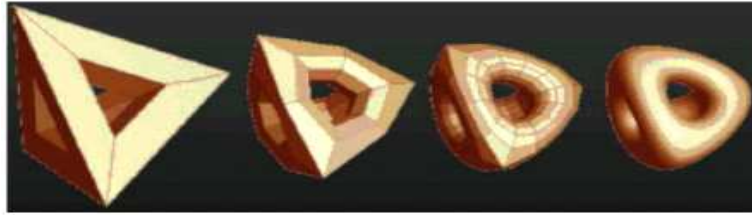
En sculpture virtuelle, la formalisation des surfaces implicites à base de squelette (aussi appelée blobs [17], soft objects [104] ou techniques par meta boules [79]) est la plus souvent utilisée. Un squelette est défini comme un ensemble de primitives géométriques (souvent points, segments ou polygones). À chaque primitive est associée une fonction potentielle qui approxime généralement une gaussienne. Le potentiel d'un point est calculé en faisant la somme de ces différentes fonctions.

Les surfaces implicites ont un formalisme adapté à la sculpture virtuelle, à l'animation d'objets déformables et au calcul immédiat de la notion d'intérieur/d'extérieur et par conséquent à la détection de collision. Toutefois, elles présentent des limitations. Il est difficile d'avoir un contrôle local de la surface. Ces surfaces sont plutôt destinées à représenter des objets de formes arrondies, les formes anguleuses étant plus délicates à obtenir.

2.3.4 Surface de subdivision

Les travaux sur les surfaces de subdivision ont trouvé leurs motivations dans le besoin de représenter des surfaces lisses (continuité \mathcal{C}^1 ou plus) et arbitraires (topologie quelconque et en particulier genre quelconque). Ces surfaces sont définies comme "limite d'une séquence de raffinements successifs d'un maillage polygonal" (voir Fig. 2.5).

Le raffinement est généralement décrit par :

FIG. 2.5 – *Subdivision d'un tétraèdre*

1. Une composante topologique : Tout algorithme de subdivision modifie la connectivité du maillage de départ. On distingue deux types de schémas. Les schémas primaux (basés face) conservent les anciens sommets et les schémas duaux (basés sommet) les suppriment.
2. Une composante géométrique : Certains algorithmes de subdivision changent la position des sommets, on parle dans ce cas de schémas approximant. D'autres algorithmes interpolant tendent vers une surface limite qui passe par les points du maillage d'origine.

On peut ainsi classifier les schémas de subdivision. Cette classification est présentée dans le tableau 2.1. Pour chaque schéma, on peut constater le type de maillage sur lequel il peut s'appliquer (triangle, quadrangle, etc.) et le type de la surface limite (\mathcal{C}^1 , \mathcal{C}^2).

Primal	Triangle	Quadrangles	Dual (quadrangle)
Approxime	Loop \mathcal{C}^2 [69]	Catmull-Clark \mathcal{C}^2 [25]	Doo-Sabin \mathcal{C}^1 [39] Midedge \mathcal{C}^1 [88]
Interpole	Mod. Butterfly \mathcal{C}^1 [115]	Kobbelt \mathcal{C}^1 [63]	

TAB. 2.1 – *Catalogue des schémas existants de subdivision.*

On distingue l'algorithme de Loop, le plus courant aujourd'hui. Il est utilisé pour des maillages triangulaires et assure une continuité \mathcal{C}^2 . Le principe général de ce schéma est basé sur une première étape de subdivision linéaire où un point est ajouté au milieu de chaque segment, suivie d'une deuxième étape de lissage où chaque point de ce nouveau maillage est remplacé par une combinaison linéaire de lui et de ses voisins directs.

Les surfaces de subdivision sont un formalisme convenable pour le rendu. Elles présentent un outil adapté pour les graphistes. Elles peuvent aussi être utilisées à des fins d'animation (voir Fig. 2.6). Leur simplicité d'implémentation n'a fait qu'accélérer leur intégration dans différentes solutions commerciales de modélisations géométriques à savoir Softimage, Maya, 3D Studio Max, Lighthwave ou bien encore Houdini. Un éventuel inconvénient de ce formalisme est qu'il n'est pas défini mathématiquement.

Pour plus de détails sur les surfaces de subdivision le lecteur est invité à se référer à [105].

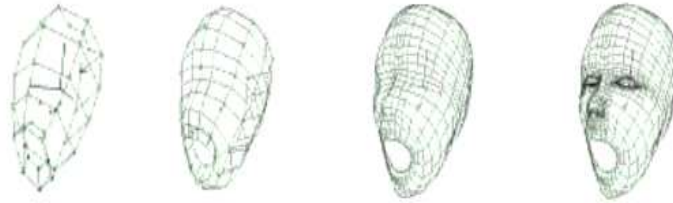


FIG. 2.6 – *Les surfaces de subdivision pour des fins d'animation*

2.4 Modèle volumique

Pour ce type de modélisation, l'objet 3D est défini directement comme un volume (vs. surface). Nous présentons deux méthodes de représentation d'un objet spatial suivant ce formalisme : la voxelisation et le module constructif CSG.

2.4.1 Voxelisation

Une manière de définir un volume est de discrétiser l'espace selon une grille cubique en un nombre fini de cubes appelés voxel (**v**olume **e**lement par analogie avec pixel **p**ixel **e**lement). Pour définir l'objet il suffit alors de lister l'ensemble des voxels qui en font partie (voir Fig. 2.7).

Cette approche est simple à mettre en œuvre. Elle permet un calcul rapide des propriétés de l'objet ainsi que la mise en œuvre des opérations booléennes d'union, d'intersection et de différence. L'inconvénient majeur de cette méthode est que sa précision est limitée par le degré de discrétisation de l'espace et que le nombre de voxels croît rapidement avec le degré de discrétisation. Une extension hiérarchique par octrees (voir Fig. 2.8) permet de palier à ce problème. Il s'agit de découper l'espace en cubes de tailles variables.



FIG. 2.7 – *Exemple de voxelisation de Stanford Bunny.*

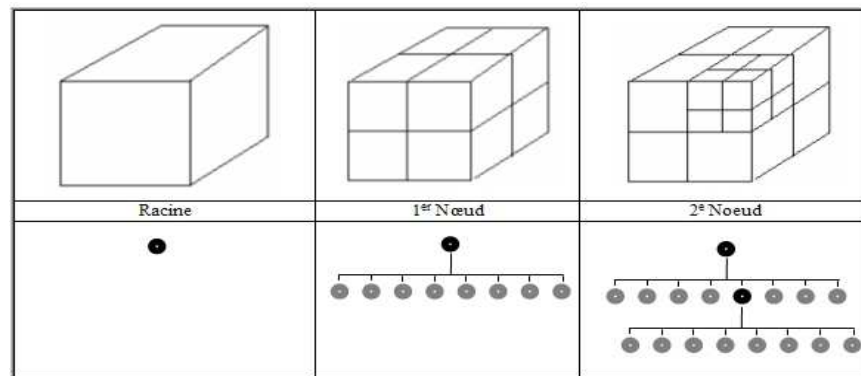


FIG. 2.8 – Exemple de modélisation sous forme d'octree. Chaque cube peut posséder trois valeurs possibles : cube intermédiaire (à diviser en cubes plus petits) cube occupé (présence d'objet) et cube inoccupé (absence d'objet).

2.4.2 Modèle constructif CSG

Le modèle de construction *CSG* (Constructive Solid Geometry) est un système de construction hiérarchique d'objets *3D* à partir de primitives de base (sphères, cylindres, cubes, etc.) et d'opérations ensemblistes (union, intersection, différence, etc.). Toutes ces données sont représentées sous forme d'arbre (voir Fig. 2.9) appelé arbre de construction où les feuilles sont constituées de primitives géométriques et les noeuds contiennent un opérateur booléen.

Les principaux avantages de cette modélisation est la facilité de conception d'objets complexes à partir de primitives simples et la visualisation de l'objet résultant sans avoir à le construire explicitement (lancer de rayons, rendu projectif). Mais, la liberté de modélisation reste restreinte par les possibilités de créer le volume désiré par un ensemble d'opérations. Une autre limitation est qu'une construction explicite de l'objet résultant (conversion en maillage par exemple) peut s'avérer très délicate.

2.5 Modèle procédural

Le modèle procédural est principalement utilisé pour modéliser des objets structuraux à savoir des plantes, un paysage, une ville, la mer, etc. C'est une technique basée sur "la croissance progressive" de la forme. Plusieurs approches existent déjà pour ce type de modélisation, on peut citer entre autre :

2.5.1 Le système de particules

Le système de particules (voir Fig. 2.10) est souvent utilisé pour modéliser une évolution : physique (feu, explosion, etc.), comportementale (foule, etc) ou encore artistique. Un objet est décrit par un ensemble de particules qui naissent, évoluent

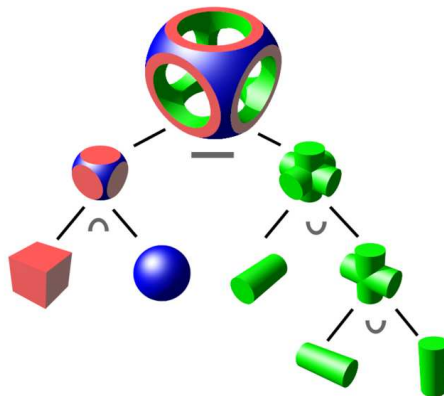


FIG. 2.9 – Arbre de construction CSG. "Le cube partiellement vidé" est le résultat d'opérations d'union, intersection et différence entre 3 primitives de base : cylindre, sphère et cube.

dans l'espace et le temps et disparaissent. Des attributs comme la couleur, la vitesse et la taille sont fonctions du temps.

2.5.2 Les fractales

Les fractales (voir Fig. 2.10) sont adaptées pour décrire des objets naturels complexes. Elles sont basées sur le principe d'auto-similarité. Le modèle à représenter est "formé d'une multitude de copies de lui même". Pour construire un objet fractal, il faut débiter avec une primitive géométrique (ligne, carré, triangle, etc.) et d'y itérer un ensemble d'opérations géométriques qui rajoutera de la complexité à l'objet initial.

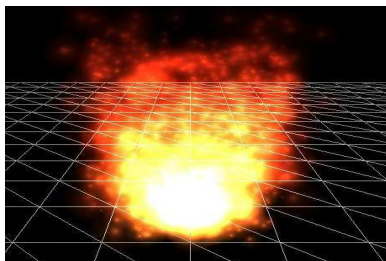


FIG. 2.10 – Modèle procédural : un système de particules rendant un feu (gauche) et une fougère fractale (droite)

2.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis avant de parler de tatouage 3D de préciser au préalable la notion d'objets 3D. Il est à noter que les techniques de tatouage opèrent majoritairement sur des objets 3D maillés.

Nous récapitulons dans le tableau 2.2, les principaux avantages et inconvénients des différentes modélisations d'objets 3D présentées tout au long de ce chapitre.

Modélisation	Avantages	Inconvénients
<i>Non-structurés :</i> Nuage de points	conception atomique puissante pour l'antialiasing rendu adaptatif	coût mémoire difficilement éditable
<i>Modèle surfacique :</i> Maillage Surfaces paramétrées Surface implicite Surfaces de subdivision	simplicité algébrique facilité de conversion facile à éditer Propriétés différentielles directes convertible en maillage calcul d'appartenance direct adaptée à la sculpture virtuelle Surface régulière adaptée au rendu contrôle local multirésolution	inadapté aux surfaces courbes coût mémoire Paramétrage complexe paramétrage difficile inadaptée aux formes anguleuses contrôle local délicat pas défini mathématiquement
<i>Modèle volumique :</i> Voxelisation CSG	affichage facile pratique pour les calculs discrets intuitif facile pour ray-tracing	coût mémoire limitations de la grille dépend du choix de base conversion maillage difficile
<i>Modèle procédural :</i> Système de particules Fractales	modélisation d'évolution modélisation d'objets naturels	pas intuitif pas intuitif

TAB. 2.2 – Récapitulatif des différentes modélisations 3D, leurs avantages et inconvénients.

3

Etat de l'art du tatouage d'objets 3D

3.1 Introduction

Maintenant que les notions de bases en tatouage sont introduites (Chap. 1) et que le vocabulaire lié aux modèles 3D est rappelé (Chap. 2), ce chapitre est dédié au tatouage d'objets 3D. Nous présenterons les notions de bases et principes du tatouage 3D avec une revue détaillée des algorithmes existants dans ce domaine.

3.2 Tatouage d'objets 3D : Principes et applications

3.2.1 Motivations et applications du tatouage 3D

Les progrès en imagerie 3D ont largement facilité la création d'objets 3D et leurs utilisations dans de nombreuses applications (scientifiques, artistiques, industrielles ou autre). L'expansion d'Internet, la multiplication des réseaux à haut débit font que les objets 3D sont de plus en plus présents dans les bases de données distribuées liées aux services multimédia. Le problème de la protection des objets 3D est devenu par conséquent un problème d'actualité. On voudrait par exemple vérifier si l'utilisation d'un objet 3D est autorisé ou non, ou obtenir des informations supplémentaires sur l'objet (pour l'authentification ou l'indexation), sur le propriétaire (copyright), ou bien encore l'acheteur (e.g pour la non répudiation).

Le projet national (RNRT) SEMANTIC-3D (Service d'Echange et de MANipulation : Tatouage, Indexation et Compression) est un exemple directement lié à ces problématiques. L'objectif principal de ce projet est la transmission de méthodes de réparation (composées d'objets 3D : pièces automobiles RENAULT) pour assister les techniciens au dépannage. Il y a alors besoin de protéger les informations échangées liées à la modélisation et à la conception des véhicules. Le tatouage 3D doit permettre de protéger ces données et/ou d'intégrer de l'information supplémentaire liée à l'origine ou à la diffusion de l'objet.

Les différentes applications du tatouage sont détaillées dans le chapitre générique en tatouage (Sec. 1.3).

3.2.2 Compromis classique : robustesse, visibilité et capacité

Comme pour tout algorithme de tatouage numérique, le tatouage d'objets 3D doit satisfaire au mieux trois contraintes deux à deux antagonistes de capacité, robustesse et visibilité. Ce paragraphe sera dédié à une étude détaillée de ce compromis dans le cas d'un support 3D.

A- Visibilité

La visibilité signifie la dégradation visuelle de l'objet 3D due au tatouage. La mesure de l'impact visuel du tatouage 3D est toujours une question délicate. Toutes les

métriques disponibles actuellement ont été développées dans le contexte de simplification de maillage ou pour du rendu guidé (*perceptually guided rendering*).

Métriques pour mesurer l'impact d'une simplification de maillage :

1. Mesures géométriques :

- *La distance de Hausdorff* [9] [31] : La distance de Hausdorff $H(M_1, M_2)$ entre deux maillages M_1 et M_2 est définie comme suit : $H_{max}(M_1, M_2) =$

$$\max\{\max_{a \in M_1} \min_{b \in M_2} d(a, b), \max_{a \in M_2} \min_{b \in M_1} d(a, b)\} \quad (3.1)$$

avec $d(a, b)$ la distance Euclidienne entre a et b dans l'espace 3D. Cette métrique est usuellement appelée erreur géométrique maximal (*maximum geometric error*). Une autre définition de la distance de Hausdorff entre maillages 3D est l'erreur géométrique moyenne (*mean geometric error*) définie par :

$$\frac{1}{A_{M_1} + A_{M_2}} \left\{ \int_{a \in M_1} \min_{b \in M_2} d(a, b) + \int_{b \in M_2} \min_{a \in M_1} d(a, b) \right\} \quad (3.2)$$

- *VSNR (Vertex Signal to Noise Ratio)* : Le VSNR consiste à additionner les distances euclidiennes entre les coordonnées des sommets des maillages M_1 et M_2

$$VSNR = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} d(a_i, b_i). \quad (3.3)$$

où N est le nombre de sommets dans M_1 et M_2 , $d()$ est la distance euclidienne dans l'espace 3D et a_i, b_i le i^{eme} sommet appartenant respectivement au maillage M_1 et M_2 .

- *Le Laplacien géométrique* [61] : le Laplacien géométrique (GL) proposé par Karni et al. exprime la distance entre le point et le barycentre des points qui lui sont connexes dans le maillage. Il fournit une mesure de la régularité locale de la surface. L'avantage de cette métrique comparée à celles listées précédemment est qu'elle permet de faire la différence entre un ajout de bruit sur les coordonnées des sommets (distorsion visuelle assez importante) et une version compressée (distorsion visuelle nettement plus acceptable).

Le Laplacien géométrique est défini par :

$$GL(p_i) = p_i - \frac{\sum_{j \in N(p_i)} d(p_i, p_j)^{-1} p_j}{\sum_{j \in N(p_i)} d(p_i, p_j)^{-1}} \quad (3.4)$$

avec $N(p_i)$ le voisinage du sommet p_i et $d(p_i, p_j)$ la distance euclidienne entre p_i et p_j .

2. **Distance sur images dérivées :** Le principe de cette mesure est de quantifier l'impact visuel de la distorsion à partir des vues $2D$ de l'objet. Lindsertom et Turk [67] proposent de générer 24 vues de chacun des deux modèles $3D$ à comparer en déplaçant la caméra suivant les vertices d'un *rhombicuboctahedron* et de calculer l'erreur quadratique moyenne entre chaque paire de vues $2D$ générées. Le problème majeur de cette mesure est que la dégradation perçue sur les projections $2D$ peut ne pas représenter fidèlement l'impact visuel sur l'objet $3D$ lui-même, comme remarqué expérimentalement par Rogowitz et Rushmeier [91].

Modèles pour un rendu guidé : Le but de cette classe de métriques est d'accélérer le rendu photo réaliste en évitant les calculs qui n'ont pas d'impacts sur le modèle rendu. Quelques travaux existent déjà dans ce domaine, on peut citer principalement les travaux de Bolin et Meyer [18] et de Ferwada et al. [44] où une métrique perceptible a été proposée afin de mesurer à quel point un motif visuel (par exemple la texture) peut cacher les artefacts géométriques.

Corsini et al. [32] [33] sont les premiers à explorer la perception humaine pour une mesure de distorsion dans le contexte du tatouage $3D$. Ils proposent une métrique basée sur la rugosité de la surface et valident leurs mesures par des tests psycho visuels inspirés de la norme ITU-T.

Alface et al. [6] proposent de comparer les projections $2D$ générées aléatoirement à partir du modèle $3D$ original et tatoué et d'utiliser le critère d'information mutuelle (MI Mutual Information) pour leur mesure de similarité entre chaque paire de vues $2D$ générées. Leur métrique a été validée par des tests psycho visuels.

B- Capacité

La capacité d'un algorithme de tatouage $3D$ est la quantité d'information qu'on peut dissimuler dans l'objet $3D$. Le nombre de bits qu'on doit/peut insérer est étroitement lié à l'application visée et à l'algorithme utilisé. Pour une technique basée sur une modification de la représentation géométrique du maillage, le nombre de bits qu'on peut dissimuler est directement lié au nombre de sommets et triangles dans le maillage. Par contre, si l'algorithme de tatouage est basé sur une modification de la courbure de l'objet, la capacité dépendra de la variation de courbure de la surface du modèle $3D$.

C- Robustesse

La robustesse est la capacité du tatouage à résister aux manipulations malveillantes (ou non) souvent appelées attaques. Ces attaques envisagées ont toutes en commun de préserver de l'intérêt au document numérique manipulé. Les attaques engendrant une dégradation jugée inacceptable ne sont pas prises en compte pour l'évaluation de la robustesse d'une technique de tatouage même si elles sont susceptibles de conduire

à une neutralisation de la marque insérée. Nous détaillerons ci-dessous les différentes attaques traitées par les auteurs d'algorithmes de tatouage 3D et considérées pour l'évaluation de la robustesse.

On suppose que l'objet 3D est représenté sous forme de maillage. C'est la manière la plus courante de représenter un modèle 3D dans le monde de l'informatique graphique d'autant plus qu'il est relativement aisé de convertir n'importe quelle autre représentation en maillage.

- **Similitudes, transformations affines :** Un objet 3D est sujet à des transformations affines de rotation, translation, et changement d'échelle lors de son utilisation. Ces modifications ne changent pas la forme de l'objet mais peuvent détruire la marque si elle n'est pas insérée dans des invariants à ces transformations. Un algorithme de tatouage basé par exemple sur l'insertion de la marque dans les directions des normales du modèle 3D risque de ne plus être valable suite à une simple rotation de l'objet 3D. Quelques solutions existent pour résoudre ce problème, principalement on peut recalibrer l'objet marqué et manipulé par rapport à l'objet original (dans le cas d'une technique de tatouage non aveugle). On peut aussi envisager de recalibrer l'objet 3D suivant ses axes principaux d'inertie avant l'insertion de la marque mais cela suppose que le tatouage ait un impact négligeable sur ce repère.
- **Bruitage et débruitage :** Supposons que la marque est insérée par des modifications d'entités géométriques définissant l'objet 3D (par exemple un faible déplacement des coordonnées des sommets du maillage), dans ce cas un ajout de bruit sur les paramètres géométriques décrivant l'objet (par exemple les coordonnées des sommets) peut rendre l'extraction peu fiable. Mais cette attaque peut aussi dégrader la qualité du modèle 3D. De même, le débruitage ou encore lissage qui consiste (dans le cas de maillage 3D) à déplacer les sommets du maillage afin d'améliorer la qualité du modèle 3D en gardant la topologie inchangée (voir Fig. 3.1), peut conduire à la destruction de la marque. Plusieurs méthodes existent déjà pour des opérations de débruitage, principalement on peut citer l'opérateur de lissage *Umbrella umbrella-operator smoothing* et l'opérateur de lissage de Taubin *lambda-mu Taubin's lambda-mu smoothing* [98].
- **Attaques affectant l'organisation des données dans le fichier 3D :** Un maillage est souvent représenté par une liste ordonnée de sommets et une liste ordonnée de polygones. Contrairement à l'image et l'audio, l'ordre des sommets et polygones est arbitraire dans un maillage 3D et sa modification n'impacte pas la forme de l'objet ainsi décrit. Quelques techniques primitives de tatouage 3D utilisent l'indice d'un sommet ou d'un polygone pour insérer un bit. Évidemment, une réorganisation des sommets ou des polygones dans le fichier 3D peut mettre à défaut l'algorithme de tatouage. Néanmoins dans le cas d'une extraction non aveugle, on peut toujours réordonner les sommets et polygones

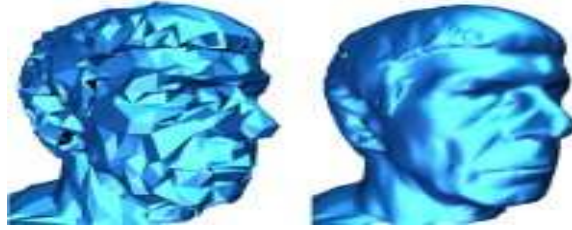


FIG. 3.1 – Lissage d'un modèle 3D.

de l'objet 3D tatoué et manipulé par rapport à l'objet original. Il est à noter, que la plupart des schémas de tatouage actuels n'utilisent plus ces données comme support de tatouage.

- **Attaques par remaillage** : On distingue deux types de remaillage : celui qui modifie le maillage original et celui qui change la représentation de l'objet jusqu'à alors décrit d'une autre manière (NURBS, CSG, etc.). Cette opération, très utilisée en pratique pour manipuler des objets 3D, introduit nécessairement un bruit de rééchantillonnage au niveau du modèle 3D et modifie la topologie (nombre et ordre des sommets) de ce dernier. Un cas particulier est la simplification de maillage (voir Fig. 3.2). Il s'agit de réduire le nombre de sommets et triangles du modèle 3D, souvent afin d'accélérer sa transmission sur un réseau. Le remaillage est l'une des manipulations les plus ambitieuses au sein de la communauté de tatouage.



FIG. 3.2 – Simplification de maillage d'un objet 3D.

- **Découpe** : La découpe de l'objet 3D consiste à extraire une partie du modèle 3D, c'est l'équivalent d'un fenêtrage (*cropping*) pour les images fixes. Dans certains cas, cela peut conduire à un objet 3D relativement peu fidèle à l'original, qui n'a plus beaucoup d'intérêt. Néanmoins, dans d'autres cas, la partie restante peut conserver la même valeur que l'objet original alors que la marque est mise en défaut.

Une solution possible pour assurer la robustesse d'un algorithme de tatouage à la découpe est d'insérer la marque plusieurs fois dans différentes parties du

modèle 3D.

- **Attaques de compression :** Par absence de standard de compression dans le cas d'objets 3D, la manière usuelle de tester la robustesse d'un algorithme de tatouage 3D à la compression est de quantifier les coordonnées des sommets. La simplification de maillage peut s'apparenter à une compression avec pertes.
- **Attaques par collusion, effacement de marque :** Cette classe d'attaques n'est pas propre aux techniques de tatouage 3D. Elle exploite la faiblesse de certains protocoles de tatouage. Dans l'attaque par effacement de marque, il s'agit de retirer la marque du modèle tatoué en supposant une connaissance de la technique de marquage utilisée. L'attaque par collusion implique la coopération de plusieurs personnes qui possèdent le même objet tatoué avec des marques différentes, afin de retirer la marque estimée. Une simple moyenne des différentes instances de l'objet annulera la marque (supposée de nature aléatoire). Une autre attaque par collusion consiste à recomposer le modèle 3D à partir de différentes instances du même objet tatoué. Il sera alors impossible de détecter une marque entière dans l'objet recomposé.

La liste que nous venons d'établir ci-dessous n'est bien évidemment pas exhaustive, néanmoins elle illustre la variété des attaques auxquelles un algorithme de tatouage doit résister.

Une analogie avec les attaques des techniques de tatouage d'images est présentée dans le tableau Tab. 3.1

Attaques 3D	Attaques 2D
Similitudes transformations affines	Similitudes transformations affines
Bruitage	Bruitage
Débruitage	Filtrage
Attaques du fichier 3D	–
Simplification de maillage	sous-échantillonnage
Découpe	Découpe
Compression	Compression
Attaques de protocole	Attaques de protocole

TAB. 3.1 – Analogie entre les attaques des techniques de tatouage 3D et 2D.

3.3 État de l'art des techniques de tatouage 3D

On décrit dans cette session les techniques de tatouage 3D les plus connues. Deux principaux critères ont été retenus pour une classification de ces techniques. Un pre-

mier critère est la méthode utilisée pour l'insertion de la marque. Suivant ce critère on peut distinguer trois principales catégories :

1. Organisation des données informatiques : Ces algorithmes modifient l'organisation des données informatiques du maillage sans modification de géométrie ou de topologie.
2. Modification de la topologie : Ces algorithmes opèrent sur des maillages 3D. Ils utilisent la topologie de l'objet (la connectivité du maillage) comme support d'insertion. La géométrie (position des sommets) reste inchangée.
3. Modification de la géométrie : Ces algorithmes modifient la géométrie de l'objet en tenant compte des données topologiques. Typiquement les auteurs proposent de légères modifications de la position des sommets.

Un second critère est l'espace d'enfouissement utilisé. La majorité des techniques tatouent des maillages. D'autres méthodes, plus rares, opèrent sur un objet 3D représenté sous forme de NURBS, arbre de construction CSG et nuage de points.

On s'intéressera par la suite au mode d'extraction de la technique (aveugle, non aveugle), à sa robustesse aux attaques, à sa capacité, si elle opère dans le domaine spatial ou transformé, etc. Selon ces critères, on peut distinguer plusieurs classes qui parfois ne contiennent qu'un seul algorithme.

Nous tenons à préciser, que pour certains algorithmes l'étape d'extraction de la marque n'est pas détaillée de façon précise. Notre état de l'art est aussi précis que les références nous l'ont permis.

3.3.1 Organisation des données informatiques

Trois techniques de tatouage utilisent l'organisation des données informatiques pour l'insertion de la marque.

Une première technique proposée par Ichikawa et al. [54] encode de l'information dans un maillage 3D présenté par une liste de sommets et une liste de triangles. Les auteurs proposent de modifier dans le fichier 3D, l'ordre des sommets, l'ordre des triangles ou bien encore l'ordre des sommets formant un triangle donné (voir Fig. 3.3). Cette technique ne modifie ni la géométrie ni la topologie du maillage. Elle n'est par contre pas robuste à un changement de codage du maillage, ni à un changement de représentation ou à un remaillage. Elle peut trouver son intérêt pour des applications de stéganographie.

Une deuxième technique, proposée par Ohbuchi et al. [84] enfouit de l'information dans une surface *NURBS* en modifiant la paramétrisation de cette dernière via une fonction homographique. Ce changement de paramètre possède trois degrés de liberté qui sont réduits en un seul par certaines contraintes. L'idée est de coder l'information à cacher par ce degré de liberté. Le changement de paramètre implique aussi un changement du vecteur des noeuds et de l'ensemble des poids pour conserver la géométrie.

OFF	OFF
49132 98260	49132 98260
-23.785717 -66.703217 106.301270	-23.785717 -66.703217 106.301270
-27.686848 -64.702660 106.700150	-27.686848 -64.702660 106.700150
-28.791845 -67.008881 106.552475	-28.791845 -67.008881 106.552475
-31.544001 -64.233200 107.175964	-31.544001 -64.233200 107.175964
-32.696758 -67.188759 107.048874	-32.696758 -67.188759 107.048874
-35.629700 -66.258934 107.459938	-35.629700 -66.258934 107.459938
-36.654587 -69.046806 107.307190	-36.654587 -69.046806 107.307190
-39.809319 -65.871834 107.700386	-39.809319 -65.871834 107.700386
-39.393673 -69.070984 107.488113	-39.393673 -69.070984 107.488113
-42.851711 -68.611862 107.594948	-42.851711 -68.611862 107.594948
-40.918461 -71.534988 107.431808	-40.918461 -71.534988 107.431808
-44.594685 -70.812912 107.611198	-44.594685 -70.812912 107.611198
-43.731117 -73.694656 107.549622	-43.731117 -73.694656 107.549622
3 0 1 2	3 0 2 1
3 2 1 3	3 2 1 3
3 2 3 4	3 4 2 3
3 4 3 5	3 4 3 5
3 4 5 6	3 4 5 6
3 6 5 7	3 6 5 7
3 6 7 8	3 6 7 8
3 8 7 9	3 8 7 9
3 8 9 10	3 8 9 10

FIG. 3.3 – Modification de l'ordre des sommets formant un triangle dans un fichier 3D.

Un troisième et dernier algorithme appartenant à cette classe de techniques de tatouage 3D est celui proposé par Fornaro et Sanna [45]. Cette technique opère sur des arbres CSG. Pour cela de nouveaux nœuds sont définis. Ces nœuds sont rattachés au modèle original CSG et contiennent la marque. Afin d'achever un tatouage invisible, les nœuds ajoutés sont des objets de volume nul (par exemple des sphères de rayon zéro). L'information dissimulée dans ces nœuds est une valeur de hashage du modèle 3D original crypté à l'aide de la clé secrète d'un algorithme de cryptage asymétrique. L'application visée est donc l'authentification de l'objet par comparaison de la valeur de hashage calculée sur cet objet avec la valeur de hashage dissimulée dans ce même objet.

3.3.2 Modification de la topologie

Cette classe d'algorithmes utilise la topologie du maillage pour l'insertion de la marque. Cette modification peut induire, comme effet secondaire, un changement des données géométriques du modèle 3D (un léger déplacement de certains sommets par exemple). Ohbuchi et al. [81] ont proposé trois techniques s'inscrivant dans cette catégorie d'algorithmes.

Une première technique connue sous le nom *TSPS* (Triangle Strip Peeling Symbol sequence embedding) consiste à dupliquer certains sommets pour "découper" les contours d'une bande de triangle. Cette bande est définie à partir d'une arête initiale et le parcours vers les arêtes suivantes (par conséquent le choix du triangle suivant) est déterminé en fonction des bits du message binaire à cacher (voir Fig. 3.9).

Cette technique de tatouage à extraction aveugle, est robuste aux transformations

géométriques et peut assurer une robustesse à la découpe par insertion de la même marque dans des parties différentes du maillage. Par contre, une simplification de maillage peut mettre à défaut l'extraction de la marque.

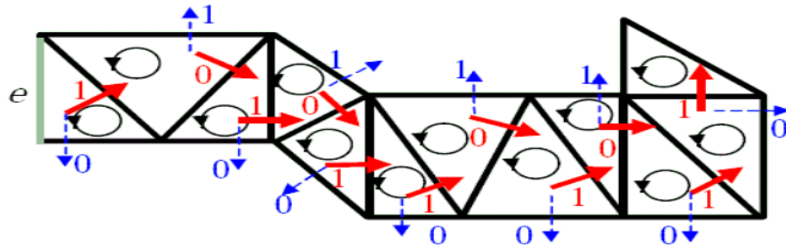


FIG. 3.4 – Parcours des triangles pour l'insertion du message binaire 10101101011. "1" est inséré pour un parcours contraire aux sens des aiguilles d'une montre et "0" sinon (figure prise de [81]).

La deuxième technique proposée par Ohbuchi et al. connue sous le nom *PSP* (Polygon Stencil Pattern-embedding) est similaire à l'algorithme *TSPS* (décrit ci-dessous) sauf que dans ce cas, les auteurs proposent de cacher un logo ou un motif en découpant tout simplement un ruban de cette forme dans la surface de l'objet 3D (voir Fig. 3.6). Comparé à la technique *TSPS*, cet algorithme est robuste aux simplifications de maillage.

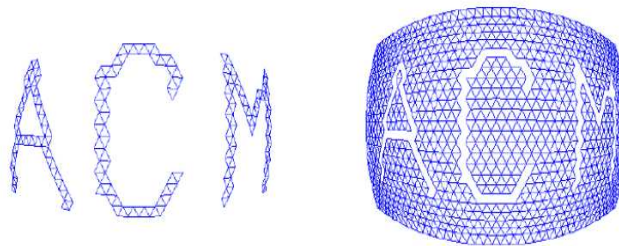


FIG. 3.5 – Objet 3D tatoué en utilisant la technique *PSP* (figure prise de [81]).

La troisième technique *MDP* (Mesh Density Pattern embedding), proposée par Ohbuchi et al. modifie la topologie pour l'insertion de la marque. Elle consiste à jouer localement sur la densité des triangles du maillage pour faire apparaître un motif. Ce motif est visible si on observe l'objet en mode "fil de fer". Une représentation en mode texturé rend le tatouage invisible. Cette technique est dite robuste aux différentes attaques géométriques et assez robuste à la simplification de maillage.

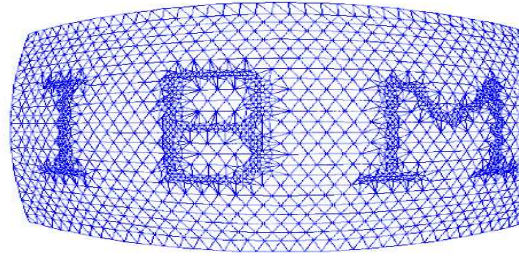


FIG. 3.6 – *Objet 3D tatoué en utilisant la technique MDP (figure prise de [81]).*

Une quatrième technique proposée par Mao et al. [73] remaille localement une partie du maillage 3D pour insérer la marque (voir Fig. 3.7). La marque est cachée dans la position des nouveaux sommets rajoutés. La sélection des triangles à remailler se fait suivant une clé secrète et le rapport entre deux segments formant une même ligne droite encode l'information à cacher. L'extraction de la marque est aveugle. Cette technique présente l'avantage d'être de haute capacité et robuste aux transformations affines. Néanmoins le tatouage est facilement détruit par une déformation locale ou une altération topologique.

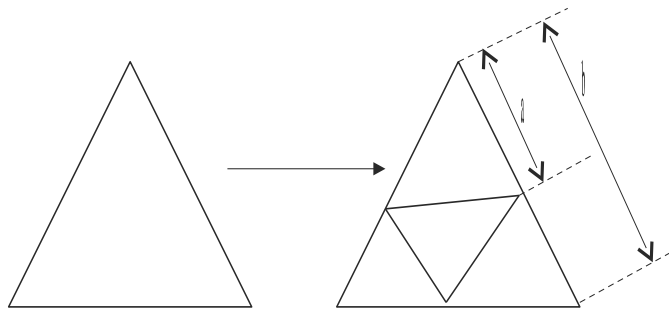


FIG. 3.7 – *Objet 3D tatoué en utilisant la technique MDP.*

3.3.3 Modification de la géométrie

La majorité des techniques de tatouage 3D modifie la géométrie de l'objet 3D pour insérer la marque. La plupart des algorithmes agissent sur des représentations de type maillage. Dans cette catégorie, certains opèrent dans le domaine spatial. Parmi ceux-ci quelques techniques ont fait le choix d'être aveugles mais pas robustes aux remaillages, d'autres ont choisi d'être robustes aux remaillages via une opération de recalage/réchantillonnage préalable à l'extraction, mais sont dans ce cas non aveugles. D'autres algorithmes utilisent des invariants géométriques et sont par conséquent théoriquement aveugles et robustes aux remaillages.

Une autre catégorie de techniques opère dans le domaine transformé : décomposition spectrale, transformation en ondelette et transformation en ondelettes sphériques.

Les autres algorithmes qui ne tatouent pas des maillages, sont plus rares et représentent pratiquement chacun une catégorie différente.

Nous présentons dans cette section une description brève des techniques les plus connues.

Domaine spatial

Bors [20, 21, 22] a proposé une technique basée sur la position des sommets. Un message est défini au moyen d'une clé secrète. Une liste de sommets est sélectionnée pour coder chacune un bit. à chacun de ces sommets est associé un voisinage ellipsoïdal. Pour coder un 0, un sommet est déplacé à l'extérieur de son voisinage et pour coder un 1, il est déplacé à l'intérieur, le tout en choisissant le déplacement qui minimise la distortion (voir Fig. 3.8). L'extraction consiste à lire si un sommet se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur du voisinage qui lui est associé, en supposant la connaissance des sommets retenus pour coder la marque. Cette technique est robuste aux transformations géométriques de rotation, translation et changement d'échelle ainsi qu'à une combinaison d'eux. La robustesse à l'ajout de bruit et la découpe a été vérifiée expérimentalement.

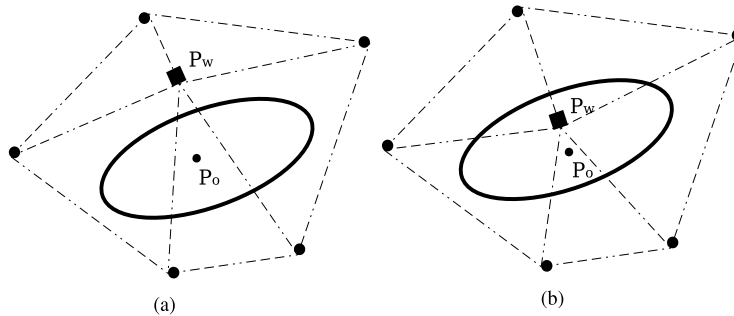


FIG. 3.8 – La configuration (a) code un bit '1', (b) code un bit '0'.

Pour vérifier l'intégrité d'un maillage triangulaire, Yeung et Yeo [110, 109] ont développé un tatouage fragile qui perturbe légèrement la position de chaque sommet. L'étape d'insertion est définie ainsi :

1. Calculer d'un double index de position $L = (L_x, L_y)$ pour chaque sommet v .
 - Définir le centroïde s de l'ensemble des sommets adjacents à v et d'indice de numérotation inférieur à celui de v

$$s = \frac{1}{|N(v)|} \sum_{u \in N(v)} u \quad (3.5)$$

- Convertir les coordonnées de s en entiers (N_x, N_y, N_z)
- Combiner ces trois entiers pour obtenir L_x et L_y . Une possible combinaison est $L_x = (N_x + N_y + N_z) \bmod XSIZE$
- 2. Calcul d'un triple index de valeur $p = (p_1, p_2, p_3)$ pour chaque sommet v et conversion des coordonnées en triplet d'entiers.
- 3. Générer une séquence binaire à partir d'une clé secrète K et des index de valeur $p(v)$. Chaque $p(v)$, donné en entrée d'une table de conversion paramétrée par K , fournit une valeur binaire $K(p(v))$.
- 4. Modifier légèrement la position des sommets v de sorte que le bit $W(L(v))$ de la marque W (imagette noire et blanc) soit égale à $K(p(v))$.

L'extraction est aveugle. Il s'agit de calculer pour chaque sommet v de l'objet, les valeurs $K(p(v))$ et $W(L(v))$, de les comparer afin de tester la validité du point, puis d'évaluer le taux de corrélation entre la marque insérée et la marque extraite :

$$c = \frac{|\{v : K(p(v)) \neq W(L(v))\}|}{|\{v\}|} \quad (3.6)$$

Si l'objet n'a pas subi de manipulations, le taux de corrélation c vaut 1. Cette méthode n'est pas robuste à une renumérotation des sommets (cf. étape 1).

Une autre technique de tatouage dans le domaine spatial proposée par Ashourian et Enteshary [8] modifie les coordonnées des vertices en utilisant les équations suivantes :

$$S1 = \begin{cases} X'_i = X_i + a \cdot M_x(p_i) \cdot W_{xi} \\ Y'_i = Y_i + a \cdot M_y(p_i) \cdot W_{yi} \\ Z'_i = Z_i + a \cdot M_z(p_i) \cdot W_{zi} \end{cases}$$

Avec $(M_x(p_i), M_y(p_i), M_z(p_i))$ le masque défini comme la différence des coordonnées de chaque sommet avec ses voisins, (W_{xi}, W_{yi}, W_{zi}) le signal de tatouage et a la force de marquage. Cet algorithme à extraction non aveugle est robuste à un ajout de bruit et à une simplification de maillage.

Benedens [14, 11] a proposé la technique *vertex flood* qui permet de cacher une marque de grande capacité dans un objet 3D représenté par un ensemble de triangles. L'application visée est la protection des droits d'auteur. Cet algorithme repose sur une modification de la distance des points au centre de gravité d'un triangle de référence. Une distance maximale D_{max} au centre de gravité du triangle de référence est choisie. L'intervalle $[0, D_{max}]$ est alors divisé en $m = 2^N$ intervalles formant l'espace de tatouage. Pour ramener un sommet à une distance voulue du centre de gravité (le tatouer), on le déplace sur la droite formée par le centre de gravité et le sommet à tatouer. Plusieurs marques peuvent être insérées en sélectionnant différents sous-ensembles de points. L'extraction de la marque est aveugle et consiste simplement à récupérer la position des sommets dans chaque sous-intervalle. Cette technique est robuste aux attaques de transformations géométriques.

Yu et al. [113] ont proposé une extension de l'idée de *Vertex Flood*. Il s'agit de répartir les sommets du maillage en N sous-ensembles définis d'une manière pseudo aléatoire par une clé secrète. Le tatouage est codé dans la distance d'un sommet par rapport au barycentre du sous-ensemble auquel il appartient. Cette méthode est robuste aux attaques de découpe et d'ajout de bruit et est rendue robuste au remaillage par une étape de recalage/réchantillonnage par rapport à l'objet original (ce qui implique une extraction en non aveugle).

Toujours pour une application qui vise à protéger les droits d'auteur, Benedens [14, 11] a proposé un deuxième algorithme de haute capacité *Triangle Flood*. Le principe est de générer un ordre de parcours des triangles du maillage et de cacher la marque dans les hauteurs de ces triangles en modifiant légèrement la position de leurs sommets.

Soucieux de la robustesse des techniques de tatouage à la simplification de maillage et au remaillage, Benedens [12, 10, 14] a proposé une nouvelle approche où l'information support utilisée est la répartition des normales des facettes du modèle 3D. La sphère unité, regroupant l'ensemble des directions orientées, est divisée en régions. Chaque normale de facette appartient à une région. La dispersion des directions des normales porte l'information de marquage. Pour coder un '0' la dispersion est réduite. Pour coder un '1' la dispersion est augmentée. La modification de la dispersion des directions des normales est réalisée par un changement de la position des sommets. Les régions utilisées pour coder un bit sont sélectionnées via une clé secrète. Ce tatouage est robuste à la simplification de maillage, aux attaques géométriques, en particulier au changement d'échelle non-uniforme.



FIG. 3.9 – Exemple de répartition des normales sur la sphère unité Chaque vecteur correspond au centre d'une région. Sa direction correspond à celle de la normale définie au centre de la région. Sa longueur représente la somme des tailles des faces dont la normale appartient à cette région (figure prise de [12]).

Une amélioration de la technique de Benedens décrite au paragraphe précédent a

été proposée par Kwon et al. [65] Le maillage 3D est divisé en six sous-parties. L'information support du tatouage est l'histogramme de répartition des normales pour chaque sous-partie. L'algorithme est rendu robuste à la découpe en cachant la même marque dans chacune des sous-parties.

Wagner [103] enfouit le tatouage dans la longueur des normales n_i définie aux sommets du maillage. La normale en un sommet est la norme du vecteur formé par le barycentre des voisins du sommet et le sommet lui-même. Modifier ces normales (remplacer quelques bits de n_i par des bits de la marque) implique un déplacement des sommets. L'extraction de la marque consiste à calculer la longueur des normales et à récupérer les bits où la marque a été cachée.

D'autres techniques de tatouage modifient des invariants géométriques. L'invariant utilisé dans le schéma Tetrahedral Volume Ratio (TVR) proposé par Ohbuchi et al. [81] est le rapport des volumes de deux tétraèdres. Un tétraèdre est déterminé par une arête et ses deux triangles adjacents. L'insertion de la marque résulte en une modification des coordonnées des points des tétraèdres au numérateur.

Cette technique vise les maillages triangulaires. Benedens a proposé une généralisation à tous types de maillage sans contraintes topologiques (Affine Independent Embedding AIE).

Le schéma Triangle Similarity Quadruple (TSQ) [81] considère un couple d'invariants géométriques pour chaque triangle, par exemple le rapport des longueurs des deux côtés et le rapport de la hauteur sur la longueur de la base $\{a/b, h/c\}$ (voir Fig. 3.10). Un entier est codé en modifiant légèrement les invariants considérés.

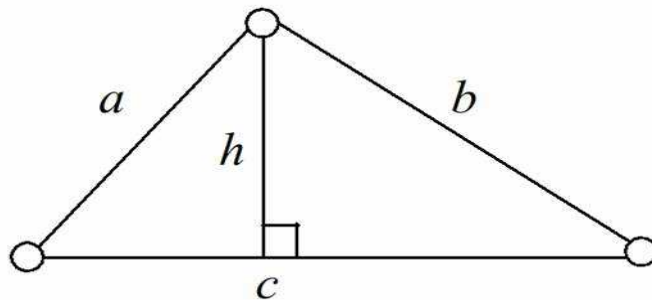


FIG. 3.10 – Les invariants géométriques $\{a, h\}$ définis pour un triangle du maillage.

L'unité de base pour coder de l'information (Macro Embedding Primitive MEP) est composée de quatre triangles adjacents comme illustré sur la Fig. 3.11. Chaque unité permet de cacher deux bits d'information (la capacité d'insertion est donc la moitié de celle du schéma TVR). Le triangle central valide la présence d'information cachée *marker*. Deux autres triangles contiennent de l'information utile *data1* et *data2*,

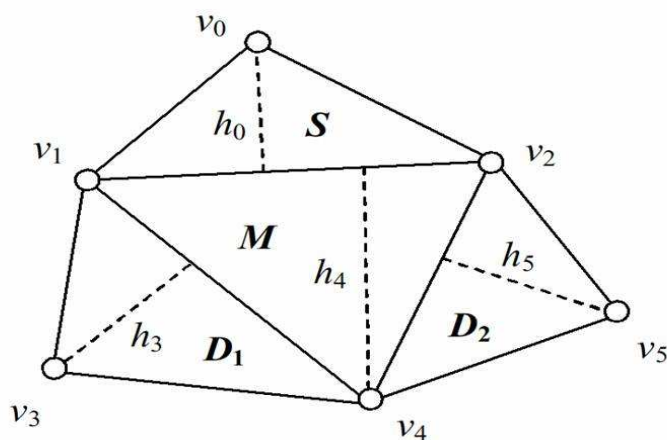


FIG. 3.11 – L'unité de base pour coder de l'information. Le marker (M) est inséré en modifiant légèrement les coordonnées des sommets v_1 , v_2 et v_4 de sorte que $\{e_{14}/e_{24}, h_4/e_{12}\} = \{b/a, h/c\}$ avec e_{ij} la distance entre les vertices v_i et v_j . L'indice de position *subscript* est codé dans la paire $\{e_{02}/e_{01}, h_0/e_{12}\}$ en modifiant légèrement la position du vertex v_0 . Les données utiles *data1* et *data2* sont codées dans les paires $\{e_{13}/e_{34}, h_3/e_{14}\}$ et $\{e_{45}/e_{25}, h_5/e_{24}\}$ en modifiant légèrement la position des vertices v_3 et v_5 (figure prise de [81]).

et le dernier triangle contient un indice de position *subscript* de manière à ordonner entre elles les informations utiles lues dans les divers quadruplets pour reconstituer un message complet. L'extraction consiste à identifier les configurations portant la marque grâce à la donnée (marker), de récupérer les données utiles (*data1* et *data2*) et des les réarranger en fonction de l'indice de position (*subscript*).

Cette technique est dite robuste aux transformations affines de rotation, translation et changement d'échelle. Par contre, un remaillage, un lissage ou bien encore une simplification de maillage peuvent mettre à défaut l'algorithme.

Cayre et Macq [27] considèrent que chaque triangle est une variable à deux états. L'état d'un triangle est déterminé par la position de la projection d'un sommet donné sur le côté opposé et cet état peut être modifié en déplaçant légèrement le sommet concerné (voir Fig. 3.12). L'ensemble des triangles qui codent le message binaire à cacher est une bande de triangles déterminée par une procédure analogue à celle de la technique TSPS : on part d'un triangle initial (d'aire maximale) et on se déplace vers les triangles adjacents en fonction d'une séquence binaire pseudo-aléatoire engendrée par une clé-secrète. La différence avec la technique TSPS est que cet algorithme ne modifie pas la topologie de l'objet.

Récemment, Cayre et al. [26] ont proposé une extension de ce schéma utilisant un parcours optimal du maillage et une insertion indexée.

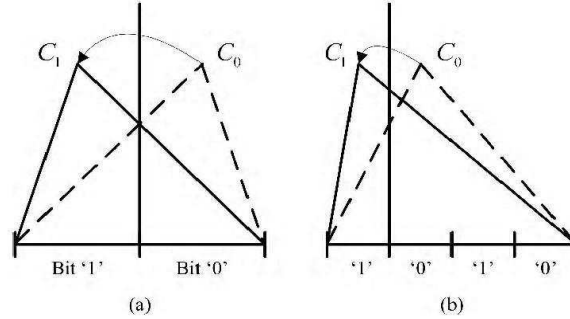


FIG. 3.12 – Dans chacune des configurations (a) et (b) un bit '1' est inséré.

Song et al. [95, 94] utilisent une technique de tatouage d'images fixes pour cacher de l'information dans leur modèle 3D. Ils génèrent la carte de profondeur cylindrique associée au maillage 3D (voir Fig. 3.13). Le repère cylindrique utilisé est aligné sur les axes principaux d'inertie du modèle 3D. La carte de profondeur est tatouée en utilisant un algorithme de tatouage d'image a priori quelconque, puis les modifications de la carte de profondeur sont répercutées sur les coordonnées des sommets du maillage original.

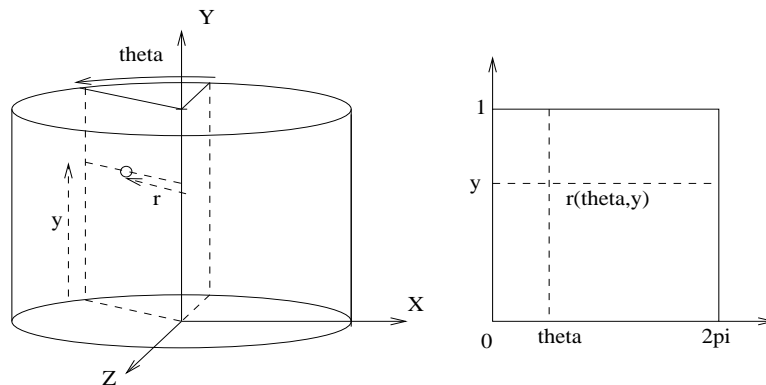


FIG. 3.13 – Calcul de la carte de profondeur d'un modèle 3D.

Dans [59], les auteurs proposent de réorienter le modèle 3D avant toute étape d'insertion et d'extraction de sorte que son centre de gravité et que son axe principal d'inertie coïncident respectivement avec le centre et l'axe z du repère. Cela assurera une robustesse aux attaques de translation et rotation (en supposant que le tatouage ait un impact négligeable sur le centre de gravité et l'axe principal du modèle 3D). Les coordonnées des vertices sont ensuite converties en coordonnées sphériques (r , θ ,

ϕ), ordonnées suivant la valeur de θ . La valeur de r (distance par rapport au centre de gravité du modèle) est modifiée en fonction du message à enfouir. Cette procédure revient à l'insertion de la marque dans le signal $1D : r(\theta)$.

Zafeiriou et al. [114] ont proposé une amélioration de cette technique. Plusieurs vertices et non un seul sont utilisés pour l'insertion d'un bit de la marque. Les sommets vérifiant la même condition sur la valeur de leurs coordonnées θ (intervalle d'appartenance) sont sélectionnés pour l'insertion d'un bit de la marque (modification de leurs coordonnées r). Cette technique est dite robuste aux transformations affines de translation, rotation et changement d'échelle et simplification de maillage mais vulnérable à la découpe.

Koh et Chen [64] visent à tatouer le flux de données qui sert à transmettre un maillage de manière progressive. Chaque sommet est en fait transmis l'un après l'autre dans un ordre qui justifie le terme progressif. Le tatouage s'applique au signal unidimensionnel constitué par le flux de données des coordonnées des sommets. La détection de la marque a lieu sur réception du flux de données et le résultat est une réponse binaire oui/non le flux est marqué.

Dans le domaine de la conception par ordinateur, on préfère souvent manipuler des surfaces que des maillages. On utilise généralement des surfaces NURBS. Quelques techniques de tatouage ont été dédiées pour cet espace particulier de représentations.

Principalement, Benedens [13] a utilisé le principe de la technique *Tetrahedral Volume Ratio Embedding* pour tatouer des NURBS. à cet effet une surface NURBS est transformée en maillage, l'algorithme original est appliqué au maillage, et les déplacements des sommets du maillage induits par le tatouage sont répercutés sur les coefficients de la description NURBS pour tatouer le modèle NURBS.

Lee et al. [66] calculent trois cartes de profondeur orthographiques d'un modèle NURBS (voir Fig. 3.14) puis tatouent ces cartes en utilisant un algorithme de tatouage d'images fixes, a priori quelconque. Les modifications des cartes de profondeur induites par le tatouage sont répercutées sur les coordonnées des points de contrôle du modèle NURBS. L'orientation du repère utilisé pour les projections orthographiques est définie par une clé secrète.

Domaine transformé

D'autres techniques de tatouage $3D$ codent de l'information dans l'espace transformé : décomposition spectrale, transformation en ondelette et transformation en ondelettes sphériques.

Il nous semble légitime avant de décrire les principales techniques s'inscrivant dans cette catégorie de rappeler le cadre théorique de ces différentes présentations.

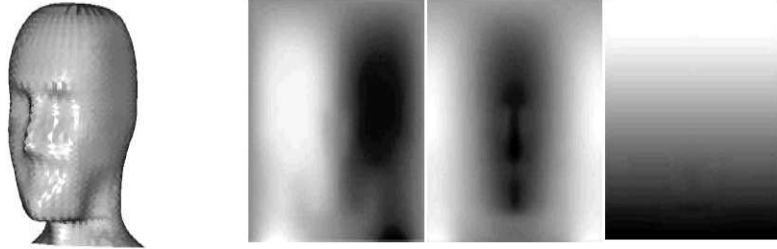


FIG. 3.14 – Cartes de profondeur orthographiques associée au modèle NURBS de visage.

Décomposition spectrale :

La décomposition spectrale d'un maillage 3D est comparable à la DCT par bloc appliquée aux images. L'idée a d'abord été proposée par Taubin [99] qui définit une matrice 'laplacien' du maillage. Cette matrice L est donnée par :

$$L_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ -d_i^{-1} & \text{si } (i,j) \text{ est une arête du maillage} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où d_i est la valence du sommet i (le nombre de sommets adjacents). La matrice L est par la suite diagonalisée pour donner la matrice de projection B .

$B^{-1}LB =$

$$\begin{pmatrix} v_0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & v_i & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & v_{N-1} \end{pmatrix}$$

Les composantes géométriques du maillage X , Y et Z sont par la suite projetées sur la base des vecteurs propres qui constituent la matrice B , donnant ainsi trois vecteurs de coefficients spectraux P , Q et R :

$$\begin{cases} P = BX \\ Q = BY \\ R = BZ \end{cases}$$

Ce sont les composantes fréquentielles du maillage. Celles correspondant aux vecteurs propres de plus faibles (resp. plus fortes) valeurs propres correspondent aux basses (resp. hautes) fréquences du maillage.

La reconstitution des composantes géométriques du maillage X , Y et Z se fait naturellement par :

$$\begin{cases} X = B^{-1}P \\ Y = B^{-1}Q \\ Z = B^{-1}R \end{cases}$$

D'autres [86] ont repris la même idée mais en utilisant une matrice laplacien différente, en l'occurrence le 'laplacien combinatoire' ou matrice de Kirchoff [19]. Cette matrice est définie par $K = D - A$ où D est une matrice diagonale dont l'élément diagonal d_{ii} est la valence du sommet numéro i du maillage et où A est la matrice d'adjacence du maillage définie par :

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ et } j \text{ sont adjacents} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

à chaque triplet de coefficients spectraux, on associe la valeur spectral S_i définie par :

$$S_i = \|P_i\|^2 + \|Q_i\|^2 + \|R_i\|^2 \quad (3.7)$$

On obtient ainsi le spectre de la géométrie.

La première technique de tatouage 3D basée sur la décomposition spectrale a été proposée par Ohbuchi et al. in 2002 [86]. Cet algorithme opère dans le domaine spectral obtenu après diagonalisation d'une matrice 'laplacien combinatoire' du maillage triangulaire. La technique 'spread spectrum' est par la suite appliquée à cette transformée. Une marque additive est insérée dans les basses fréquences des coefficients spectraux P , Q et R . Cette méthode non aveugle est robuste aux attaques de transformations affines, de découpe. Une étape de recalage/rééchantillonnage par rapport à l'objet original assure la robustesse au remaillage.

Une extension de cette technique a été proposée pour l'appliquer à des modèles 3D présentés sous forme de nuage de points [85].

Il est à noter que la diagonalisation d'une matrice de grande dimension (nombre de sommets du maillage) est une opération très lourde et numériquement instable, c'est pourquoi le maillage est initialement divisé en régions (comportant un nombre raisonnable de sommets) et chaque région est traitée séparément.

Benedens et al. [15] ont proposé une amélioration du compromis capacité - visibilité de ce schéma. Il s'agit d'insérer la marque dans la transformée de la normale locale aux sommets plutôt que dans les coefficients P , Q et R .

Cayre et al. ont proposé une technique aveugle similaire à celle d'Ohbuchi et al. [86]. La matrice laplacien utilisée pour obtenir la décomposition fréquentielle du maillage est celle proposée par Taubin. L'originalité de cet algorithme par rapport à celui d'Ohbuchi et al. est que chaque région est d'abord rééchantillonnée pour obtenir un graphe de connexité des sommets prédéfini et régulier (la valence de chaque sommet étant de

6 sauf aux bords). Le graphe de connexité final étant défini à l'avance, la matrice de diagonalisation de laplacien peut être précalculée. Une autre différence est que cette technique modifie les coefficients spectraux de hautes fréquences et évite de changer les basses fréquences pour des raisons de visibilité. Ce schéma résiste aux attaques de transformations affines. Il n'emploie pas de procédure de recalage/reechantillonnage avant l'extraction du tatouage et n'est de ce fait pas robuste au remaillage. La robustesse à l'ajout de bruit est comparable à la technique d'Ohbuchi et al.

Alface et al. [5] ont proposé une technique avec de meilleures performances aux attaques de connectivité comparée à celle de Cayre et al. L'originalité de cet algorithme par rapport à celui de Cayre et al. est de partitionner le maillage via une triangulation géodésique de Delaunay des points caractéristiques sélectionnés automatiquement.

Récemment, Wu et Kobbelt [107] ont proposé de calculer le spectre 3D du maillage en utilisant les fonctions de bases radiales (Radial Basis Functions RBF). Ces fonctions sont centrées sur k ($k \ll n$) sommets du maillage choisies aléatoirement. Une matrice $k \times n$ est par la suite décomposée via la technique SVD. La valeur de k étant largement inférieure à n , le temps de calcul de la SVD est négligeable en comparaison avec la diagonalisation de la matrice laplacien.

La technique de tatouage est similaire à celle d'Ohbuchi et al. [86]. La robustesse aux attaques de ces deux techniques est comparable. Le temps de calcul est moins important pour la méthode de Wu et Kobbelt [107] et ne nécessite pas une partition du maillage en régions.

On peut retenir, en conclusion, que les techniques de tatouage qui opèrent dans le domaine spectral présentent de bonnes performances quant à la robustesse aux attaques. Par contre, elles s'avèrent coûteuses en temps de calcul et numériquement instables; et sont de ce fait principalement dédiées aux objets 3D avec un nombre de sommets inférieur à 10^4 .

Décomposition en ondelettes :

L'idée de base derrière la décomposition en ondelettes est de considérer qu'un objet 3D est décrit par un maillage grossier de base et par un ensemble de raffinement qualifiés de coefficients d'ondelettes [60].

Plus précisément, on considère un objet 3D décrit de manière grossière par un maillage triangulaire de base. Ce maillage est affiné en subdivisant chaque triangle en quatre sous-triangles (voir Fig. 3.15), et l'opération est répétée jusqu'au niveau voulu.

Quand on passe d'un niveau de précision au suivant, on crée de nouveaux sommets qui par défaut sont les milieux des arêtes du maillage du niveau de départ. à ces points on associe des vecteurs de déplacement qui sont qualifié de coefficients d'ondelettes et qui permettent d'améliorer le niveau de détail du modèle 3D.

L'objet 3D est donc décrit par un maillage grossier de base et par un certain

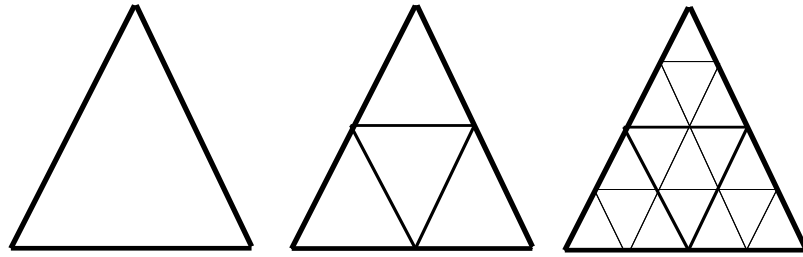


FIG. 3.15 – Subdivision de chaque triangle en 4 sous triangles.

nombre de coefficients d'ondelettes.

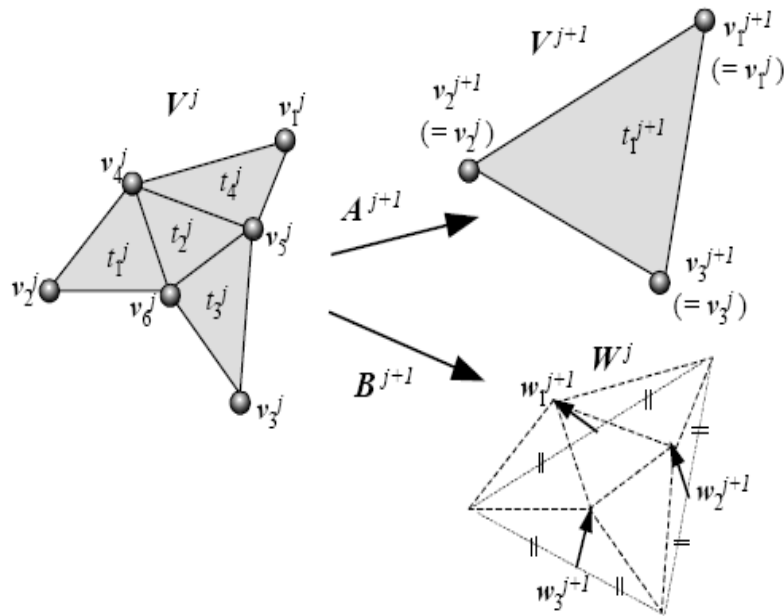


FIG. 3.16 – Interprétation géométrique des coefficients d'ondelettes (figure prise de [60]).

La figure Fig. 3.16 montre une interprétation géométrique des coefficients d'ondelettes. Les quatre triangles du niveau de résolution j sont mergés en un seul triangle t_1^{j+1} . La position des sommets v_1^j , v_2^j et v_3^j reste inchangée. Le détail perdu à la résolution $j+1$ est stocké dans les vecteurs w_1^{j+1} , w_2^{j+1} et w_3^{j+1} appelés coefficients wavelet. Chacun de ces vecteurs présente comme extrémités : le milieu de l'arête du triangle t_1^{j+1} et l'un des sommets v_4^j , v_5^j et v_6^j perdus à la résolution $j+1$. Le polygone formé par v_1^j , v_2^j , v_3^j , v_4^j , v_5^j et v_6^j peut être décrit comme une combinaison du polygone approximant formé par v_1^{j+1} , v_2^{j+1} , v_3^{j+1} et des coefficients d'ondelettes w_1^{j+1} , w_2^{j+1}

et w_3^{j+1} .

La matrice A^{j+1} reliant les sommets du niveau V^j à ceux du niveau V^{j+1} ($V^{j+1} = A^{j+1}V^j$) est dans ce cas définie par :

$$A^{j+1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

et la matrice B^{j+1} reliant les sommets du niveau V^j aux coefficients d'ondelettes W^{j+1} ($W^{j+1} = B^{j+1}V^j$) est définie par :

$$B^{j+1} = \begin{pmatrix} -1/2 & -1/2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1/2 & 0 & -1/2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/2 & -1/2 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Plus de détails sur la décomposition en ondelette sont disponibles dans [70].

Kanai et al. [60] ont proposé le premier schéma de tatouage 3D dans le domaine des ondelettes. Cet algorithme effectue une décomposition en ondelettes du maillage avec la technique de Lounsbery et al. [70]. La marque est insérée dans la norme des coefficients d'ondelette et la géométrie tatouée est reconstruite à partir de ces coefficients modifiés. Pour des raisons de visibilité, seules les coefficients d'ondelettes d'amplitudes assez grandes sont considérés pour l'insertion de la marque. L'extraction de la marque est opérée par comparaison des coefficients d'ondelettes du modèle original et tatoué. Cette méthode non aveugle est robuste aux attaques de transformations affines et à l'ajout de bruit.

Plus récemment, Ucheddu et al. [101] ont proposé une amélioration de l'algorithme de Kanai et al. [60]. La différence principale est que cet algorithme opère en mode aveugle. La détection de la marque revient à un calcul de corrélation entre la marque insérée et le maillage à tester.

La principale limitation de ces deux techniques est qu'elles visent uniquement des maillages semi-régulier. Cette limitation a été abordée dans [102] en proposant une décomposition en ondelette pour des maillages irréguliers.

Jin et al. [56] effectuent une transformée en ondelettes sphériques du maillage pour l'insertion de la marque. Le principe de leur technique non aveugle de tatouage est similaire à celui de Kanai et al. [60].

Représentation progressive :

La représentation progressive peut être considérée comme une sorte de décomposition en ondelette [53]. Le principe consiste à inverser une suite d'opérations de

simplification de maillage. Ainsi, étant donné un maillage triangulaire, on réduit le nombre de sommets un par un en effectuant une suite de contractions d'arêtes. Une telle opération consiste à choisir une arête du maillage et à remplacer ses deux extrémités par un seul nouveau sommet. À chaque pas, on choisit l'arête et le nouveau sommet qui minimisent la distortion entre le nouveau maillage et le maillage original, et l'opération est répétée jusqu'au niveau voulu. À la fin des opérations, on obtient un maillage grossier de base ainsi que la séquence de contraction d'arêtes qui y a conduit à partir du maillage détaillé original.

On peut alors décrire le maillage original par la donnée du maillage grossier et d'une séquence de dédoublement de sommets qui est l'inverse de la séquence de contraction d'arêtes.

Praun et al. [89] ont associé une fonction de base à chaque opération de dédoublement de sommet. Cette fonction définit une déformation de l'objet en déplaçant les sommets dans un certain voisinage du sommet dupliqué. Pour l'insertion de la marque, ils choisissent les opérations de duplication de sommets qui modifient le plus la géométrie et utilisent chaque fonction de base associée pour modifier légèrement la géométrie avec une amplitude qui code de l'information. L'extraction de la marque se fait après un recalage et un rééchantillonnage de l'objet tatoué avec l'objet original. Ce schéma est l'un des plus robuste proposé actuellement. Il résiste aux attaques de transformations affines, de connectivité, à l'ajout de bruit et à la découpe.

Yin et al. [112] ont voulu généraliser l'idée de l'algorithme de Praun et al. pour l'appliquer à d'autres présentations multi-resolution d'un maillage triangulaire. Ils construisent une présentation multi-resolution d'un maillage triangulaire et choisissent un maillage grossier particulier pour y insérer la marque par modification géométrique (au lieu d'utiliser un ensemble de niveaux de détails). L'extraction se fait après une étape de recalage/rééchantillonnage par rapport à l'objet original pour assurer la robustesse à de nombreuses attaques, dont les conversions de format.

3.3.4 Autres attributs

Cette catégorie regroupe quelques techniques qui considèrent d'autres attributs associés aux modèles 3D pour l'insertion de la marque. Ces attributs peuvent être la texture, la couleur, l'opacité, etc.

Dans les articles d'Ohbuchi et al. [82, 83], les auteurs indiquent la possibilité d'insérer la marque dans certains attributs attachés à la géométrie de l'objet 3D tels que les coordonnées de sa texture, des paramètres de couleur, d'opacité associés à chaque sommet, ligne ou facette. Quelques résultats préliminaires pour un tatouage dans les coordonnées de texture sont présentés dans [82]. Les auteurs font également mention de la possibilité d'utiliser les paramètres d'une scène VRML que sont les interpolateurs, caméra, etc. comme espace de tatouage, ou encore de tatouer les tables d'animations des modèles 3D animables.

Garcia et Dugelay [48] ont proposé une technique de tatouage d'objets 3D basée sur la texture (voir Fig. 3.17). Le principe de base de cet algorithme est d'enfourer une information dans le modèle 3D en tatouant sa texture par un algorithme de tatouage d'images fixes. L'objet tatoué peut alors être publié puis utilisé dans des images virtuelles. La vérification que l'objet représenté est protégé consiste à reconstruire l'image de texture (à partir de la/les vues 2D représentatives du modèle 3D) et d'extraire le tatouage de l'image de texture reconstruite.

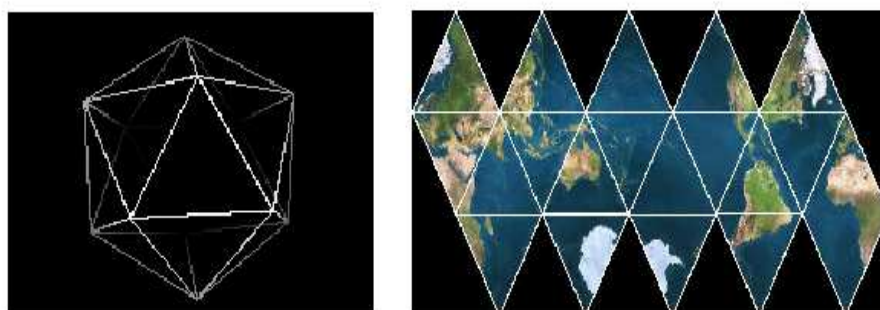


FIG. 3.17 – Géométrie 3D et image de texture associée.

Pour terminer ce tour d'horizon, une technique à la frontière du domaine couvert par le présent état de l'art a été proposée par Hartung et al. [51]. Cet algorithme s'intéresse à des séquences vidéo de modèles 3D de visages animés par des flux de paramètres au format MPEG-4 et où les auteurs proposent de tatouer le flux de paramètres d'animations et non pas l'objet 3D lui-même.

Le tableau récapitulatif 3.2 résume les quelques caractéristiques des algorithmes que nous venons de voir ². On peut retenir que la majorité des techniques opèrent sur des représentations de type maillage, et modifient la géométrie aussi bien dans le domaine spatial que transformé.

²Notations relatives au tableau 3.2 : application (*appli.*), représentation (*Repres.*), Organisation des données (*Org.d.*), mode d'extraction (*Extrac.*), robustesse (*Robus.*) Topologie (*Topo.*), géométrie spatiale (*Geo. S.*), géométrie transformé (*Geo. T.*), stéganographie (*steg.*), droit d'auteur (*D. aut.*), authentification (*authent.*), intégrité (*Integ.*), maillage (*M.*), NURBS (*N.*), Nuage de points (*Np.*), aveugle (*A.*), non aveugle (*Nav.*), transformation affines (*Taff*), découpe (*Dp*), remaillage (*Rg*), ajout de bruit (*Br*), simplification de maillage (*SimpM.*)

Schéma	Appl.	Domaine	Représ.	Extrac.	Robust.
[54]	Stég.	Org. d	M.	Av.	Faible
[84]	Stég.	Org. d	N.	NAv.	-
[45]	Authent.	Org. d	CSG	Av.	-
[81]	Stég.	Topo.	M.	Av.	Taff, Dp
[73]	Stég.	Topo.	M.	Av.	Faible
[20, 21, 22]	D. aut.	Géo. S.	M.	Av.	Taff, Br, Dp
[110, 109]	Intég.	Géo. S.	M.	Av.	Faible
[8]	D. aut.	Géo. S.	M.	NAv.	Br, SimpM.
[14, 11]	D. aut.	Géo. S.	M.	Av.	Taff
[113]	D. aut.	Géo. S.	M.	NAv.	Taff, Dp, Br, Rg
[12, 10, 14]	D. aut.	Géo. S.	M.	Av.	Taff, Br, Rg, SimpM.
[65]	D. aut.	Géo. S.	M.	Av.	Taff, Br, Rg, SimpM., Dp
[103]	D. aut.	Géo. S.	M.	Av.	Taff, Br, Dp
[81]	Steg.	Géo. S.	M.	Av.	Taff, Br, Dp
[27, 26]	Steg.	Géo. S.	M.	Av.	Taff, Br, Dp
[95, 94]	D. aut.	Géo. S.	M.	Av.	Taff, Rg
[59]	D. aut.	Géo. S.	M.	Av.	Taff, Rg
[114]	D. aut.	Géo. S.	M.	Av.	Taff, Br, Dp
[64]	D. aut.	Géo. S.	M.	Av.	Taff, Br, Dp
[13]	Steg	Géo. S.	N.	Av.	Taff, Br, Dp
[66]	D. aut.	Géo. S.	N.	Av.	Taff, Rg
[86]	D. aut.	Geo. T.	M.	NAv.	Taff, SimpM, Br, Dp, Rg
[85]	D. aut.	Geo. T.	Np.	NAv.	Taff, SimpM, Br, Dp, Rg
[15]	D. aut.	Geo. T.	M.	NAv.	Taff, SimpM, Br, Dp, Rg
[X]	D. aut.	Geo. T.	M.	Av.	Taff, Br
[5]	D. aut.	Geo. T.	M.	Av.	Taff, Br, SimpM
[107]	D. aut.	Geo. T.	M.	NAv.	Taff, SimpM, Br, Dp, Rg
[60]	D. aut	Geo. T.	M.	Nav.	Taff, SimpM, Br, Dp, Rg
[101]	D. aut	Geo. T.	M.	Av.	Taff, SimpM, Br, Dp, Rg
[56]	D. aut	Geo. T.	M.	Nav.	Taff, SimpM, Br, Dp, Rg
[89]	D. aut	Geo. T.	M.	Nav.	Taff, SimpM, Br, Dp, Rg
[112]	D. aut	Geo. T.	M.	Nav.	Taff, SimpM, Br, Dp, Rg
[82, 83]	D. aut.	Autre	-	-	-
[48]	D. aut.	Autre	-	-	-
[40]	-	Autre	-	-	-

TAB. 3.2 – Récapitulatif des techniques de tatouage 3D

3.4 Conclusion

Durant ces dernières années, le tatouage $3D$ a reçu une attention particulière de la communauté de tatouage, mais qui reste modeste comparée à celle attribuée à l'image, l'audio ou bien encore la vidéo.

Le tatouage $3D$ présente plusieurs similarités avec les techniques de tatouage développées pour les autres médias, mais la nature d'un objet $3D$ (i.e. la manière informatique et mathématique dont il formalisé) fait de son tatouage un problème à la fois différent et intéressant : pas de parcours 'naturel' du modèle $3D$ (l'ordre des sommets et triangles d'un maillage est arbitraire), différentes formes de représentation (e.g. maillage, NURBS, CSG, etc.), la distortion doit être évaluée non pas pour le modèle $3D$ lui même mais pour ses projections (image, vidéo), etc.

L'état de l'art que nous venons d'établir illustre la diversité des techniques existantes actuellement (spécialement pour des modèles $3D$ maillés), mais il est à noter que plusieurs sujets et problématiques restent non- résolus. Il est plutôt optimiste de penser qu'une technique de tatouage robuste aux divers attaques sera proposée dans le futur proche.

Les techniques de tatouage actuellement existantes restent tout de même, pour un environnement spécifique et une application précise (droit d'auteurs, intégrité, steganographie) un outil fiable.

Deuxième partie
Contributions

1

Tatouage 3D et récupération 2D

1.1 Introduction : Principe et motivation

Malgré la généralisation du tatouage numérique et la diversité des techniques existantes actuellement, aucune technique n'a été consacrée à la sécurisation des représentations visuelles des objets 3D (avec ou sans texture) au moyen de techniques de tatouage.

Il est certes vrai que plusieurs techniques ont été développées pour assurer la protection géométrique du modèle 3D en lui-même (cf. section 3.3) et ceci est évidemment très important pour faire respecter les droits d'auteur sur une forme géométrique ; mais malheureusement ces techniques ne permettent pas de savoir si un objet 3D apparaissant dans une image ou une scène virtuelle est tatoué ou non, alors qu'il est peut être plus facile de mettre main sur une image frauduleuse générée à partir d'un objet 3D que sur les données 3D suspectes elles-mêmes.

C'est sous cet angle que nous avons abordé la conception de notre méthode de tatouage. L'idée proposée et soumise à l'expérimentation consiste à tatouer un objet 3D de sorte que le tatouage soit toujours présent, sous une forme ou sous une autre dans les images 2D résultantes (voir Fig. 1.1).

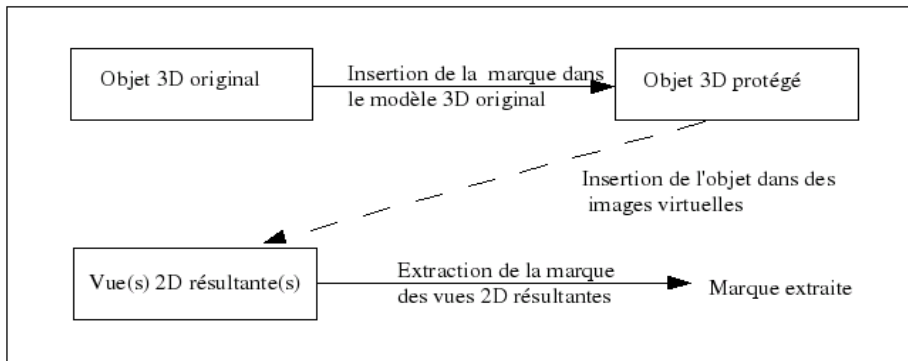


FIG. 1.1 – Principe général de l'approche asymétrique 3D/2D de tatouage (insertion en 3D et récupération en 2D).

Nous décrivons dans ce chapitre notre algorithme de tatouage d'objets 3D basé sur la silhouette dont le but est de protéger les représentations visuelles après que celui-ci ait été tatoué. Nous présenterons dans la section 1.2 une vue d'ensemble de l'algorithme. Puis nous détaillerons dans les sections 1.3 - - 1.6 les différentes étapes de la technique.

1.2 Vue d'ensemble de l'algorithme

Le principe de base de notre algorithme de tatouage est illustré par la Fig. 1.2. Étant donné un objet 3D représenté sous forme de maillage, on protège l'objet en tatouant sa/ses silhouette(s) apparente(s). Une première étape consiste à extraire la

silhouette du modèle à tatouer (*étape 1*). Une fois la silhouette extraite et discrétisée (*étape 2*), on la tatoue avec un algorithme de tatouage de contour. L'objet tatoué peut alors être publié et utilisé dans des images ou scènes virtuelles. Ensuite on peut vérifier que l'objet représenté est protégé en extrayant son contour (*étape 4*), le discrétiser (*étape 5*) et détecter la présence ou non de la marque (*étape 7*) après avoir sélectionné la meilleure vue (la vue la plus similaire) parmi les vues utilisées pendant le processus d'insertion.

Le choix de la silhouette du modèle $3D$ comme support de tatouage se justifie par le fait que pour des objets $3D$ non-texturés (ex. issus de la CAO), une fois projetés, seule la donnée de silhouette/contour peut être récupérée à partir des vues $2D$ générées.

Une vue d'un objet $3D$ ne représente généralement qu'un seul côté, et fournit une information partielle sur le modèle $3D$. Si on veut recouvrir au mieux le modèle $3D$ et maximiser la probabilité d'extraction de la marque des vues $2D$, il peut être utile, dans la mesure du possible, de considérer différentes silhouettes (c.-à-d. différents points de vue) pour insérer la marque. Cette problématique sera abordée dans la session 1.6.

1.3 Extraction de la silhouette

La première étape de notre approche de tatouage est d'extraire la porteuse de la marque à savoir la/les silhouette(s) du modèle $3D$.

Intuitivement, la silhouette d'un modèle $3D$ est la ligne qui sépare cet objet du fond, pour un point de vue donné.

D'un point de vue mathématique, la silhouette est définie comme l'ensemble des points d'une surface qui délimite ses parties visibles de ses parties invisibles pour un point de vue donné. Or, les parties visibles d'une surface sont les zones où la normale à la surface pointe dans la direction du point de vue ; à l'inverse, les parties invisibles d'une surface sont les zones où la normale à la surface pointe dans la direction opposée. Ainsi, la silhouette est définie par l'ensemble des points où la direction du regard est perpendiculaire à la normale à la surface. Si, pour un point p quelconque de la surface S , on note $\vec{V}(p)$ le vecteur unitaire qui représente la direction du regard, et $\vec{N}(p)$ la normale à la surface en ce point (voir Fig. 1.3), alors la silhouette est définie par l'ensemble H tel que :

$$H = \{p \in S \mid \vec{v}(p) \cdot \vec{n}(p) = 0\} \quad (1.1)$$

Quelques algorithmes existent actuellement pour calculer la silhouette d'un modèle $3D$ représenté sous forme de maillage.

Technique force brute

Une première technique [55] dite force brute exploite directement la définition de la silhouette. Elle consiste à parcourir toutes les arêtes du maillage et vérifier

1. Soit l'arête courante n'est associée qu'à une face dans ce cas c'est une arête de la silhouette.

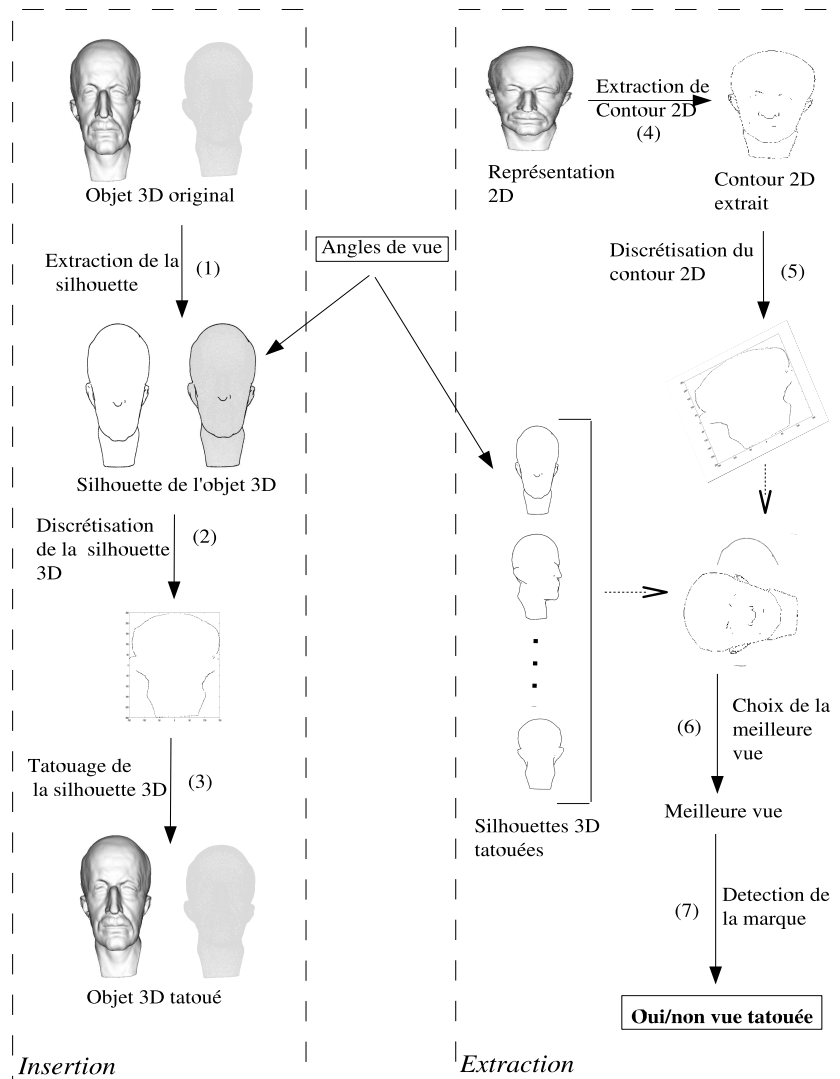
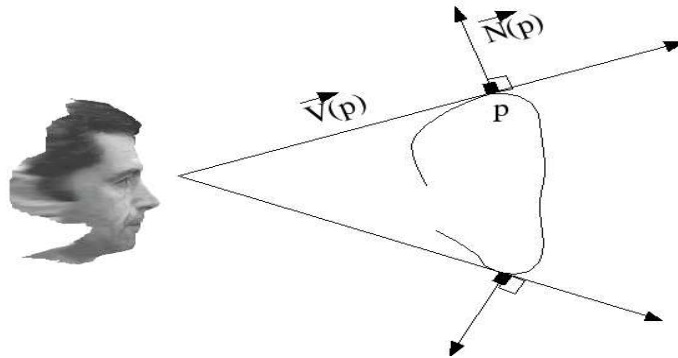


FIG. 1.2 – Schéma général.

2. Soit elle est associée à deux faces F_1 et F_2 et dans ce cas on note \vec{N}_1 et \vec{N}_2 les normales de F_1 et F_2 et \vec{V} un vecteur formé par la position de la caméra et un point de l'arête en question.
 - Si $(\vec{N}_1 \cdot \vec{V}) \cdot (\vec{N}_2 \cdot \vec{V}) < 0$ alors l'arête courante est une arête de la silhouette (F_1 et F_2 sont orientées l'une de face l'autre de dos par rapport à la caméra).
 - Sinon ce n'est pas une arête de la silhouette.

Cette technique est assez simple à mettre en œuvre, son inconvénient majeur est sa complexité qui augmente linéairement avec le nombre d'arêtes du maillage.

FIG. 1.3 – Le point p est un point de la silhouette.

Vertex	VFB	VFB	VFB	VFB
1	200	300	400	500
2	300	500	x00	x00
3	400	500	x00	x00
4	500	x00	x00	x00
5	x00	x00	x00	x00

FIG. 1.4 – Liste des arêtes du maillage et leurs drapeaux associés. F , B désignent respectivement les drapeaux de dos et de face par rapport à la caméra. Ils sont initialisés à 0.

Technique brute

Une deuxième technique, dite brute, proposée par Buchanan et al. [23] utilise un 'buffer' d'arêtes. Elle parcourt les polygones du maillage plutôt que les arêtes pour l'extraction de la silhouette. À chaque arête du maillage, elle associe deux drapeaux (*flag*), identifiant si l'arête est de face (F) ou de dos (B) par rapport à la caméra. Les deux drapeaux sont initialisés à 0 (voir Fig. 1.4).

Pour chaque polygone du maillage, s'il est de dos (resp. de face) par rapport à la caméra, XOR un 1 avec tous les drapeaux B (resp. F) des arêtes le formant. Chaque arête qui partage un polygone de dos et un polygone de face par rapport à la caméra, a ses drapeaux F et B mis à 1 et est par conséquent une arête de la silhouette. Tous les autres drapeaux sont remis à zéro (voir Fig. 1.5).

Technique stochastique

Markosian et al. [74] proposent une méthode dite stochastique de recherche de silhouette. Ils exploitent la cohérence spatiale pour ne tester qu'un sous-ensemble des arêtes du modèle polygonal. Il s'agit d'une méthode récursive qui sélectionne

Vertex	VFB	VFB	VFB	VFB
1	211	300	411	500
2	311	500	x00	x00
3	411	500	x00	x00
4	500	x00	x00	x00
5	x00	x00	x00	x00

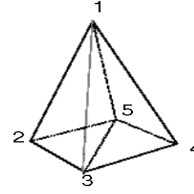


FIG. 1.5 – La silhouette est composée par l'ensemble des arêtes $\{1,2\}$, $\{1,4\}$, $\{2,3\}$ et $\{3,4\}$.

aléatoirement un échantillon d'arêtes, identifie si ces arêtes appartiennent ou non à la silhouette (arête partageant deux polygones, l'un de face l'autre de dos par rapport à la caméra), et teste à chaque étape les arêtes au voisinage des arêtes de la silhouette détectées à l'étape précédente.

Cette technique est moins coûteuse en temps de calcul comparée aux algorithmes décrits précédemment. Néanmoins, les performances de la technique sont étroitement liées au nombre d'arêtes initialement sélectionnées. Les auteurs notent que pour une meilleure qualité de la silhouette rendue (c.-à-d. pour trouver la quasi totalité des arêtes de la silhouette) le nombre d'arêtes choisies aléatoirement à la première étape du processus doit être proportionnel à la racine carrée du nombre total d'arêtes du maillage.

Technique via une sphère Gaussienne

Benichou et al. [16] proposent de plaquer le maillage 3D en une sphère Gaussienne³ pour l'extraction de sa silhouette.

La présentation d'une arête E_i dans la sphère gaussienne est définie par $A(E_i) = N_1(E_i)ON_2(E_i)$ avec $N_1(E_i)$ et $N_2(E_i)$ les normales aux polygones associées à l'arête E_i et O l'origine de l'espace Euclidien (voir Fig. 1.6).

Si on note par $P_{\vec{v}}$ le plan orthogonal à la direction du regard et passant par O , la silhouette est définie par :

$$E_i \in S_{\vec{v}} \leftrightarrow A(E_i) \cap P_{\vec{v}} \neq \emptyset \quad (1.2)$$

La problématique d'extraction de silhouette revient alors à une recherche dans la sphère gaussienne des arcs A_i interceptés par le plan $P_{\vec{v}}$.

Technique par interpolation

Une autre méthode de détection de silhouettes proposée par Hertzmann [52] consiste à interpoler les normales aux sommets du modèle polygonal et à calculer le produit

³La sphère Gaussienne d'un objet représente la distribution des normales aux surfaces. Un point sur la sphère Gaussienne correspond à la normale à la surface en ce point.

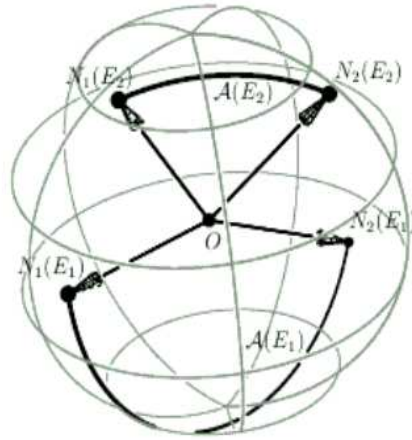


FIG. 1.6 – La sphère Gaussienne contenant deux arcs $A(E_1)$ et $A(E_2)$ associés respectivement aux arêtes E_1 et E_2 du maillage (figure prise de [16]).

scalaire normalisé d_i de la normale n_i et du vecteur de vue pour chaque sommet.

$$d_i = \frac{n_i \cdot (x_i - C)}{\|n_i\| \|x_i - C\|} \quad (1.3)$$

avec C la position de la caméra et x_i un sommet du maillage.

On étudie par la suite le signe de d_i pour chaque sommet :

$$s_i = \begin{cases} + & d_i \geq 0 \\ - & d_i < 0 \end{cases}$$

Chaque fois que l'on obtient des signes opposés pour les produits scalaires obtenus en deux sommets connectés par une arête $s_i \neq s_j$, on en déduit que ce produit s'annule le long de cette arête. Le point où ce produit s'annule est obtenu en interpolant les valeurs aux sommets. Comme on se place dans le cas où les faces sont triangulaires, pour chaque face, soit on ne détecte aucun point où le produit s'annule, soit on en détecte deux, dans ce cas il est possible de tracer un segment reliant ces deux points et traversant la face. L'ensemble de ces segments constitue la silhouette. Cet algorithme résulte en un ensemble d'arêtes qui approxime la silhouette de la surface originale.

Remarques concluantes

D'autres techniques, que nous détaillerons pas ici, utilisent une étude hiérarchique pour l'extraction de la silhouette. Le lecteur est invité à se référer aux articles [47, 92] pour plus de détails sur ces algorithmes.

En ce qui nous concerne, nous avons opté pour la méthode force brute pour l'extraction de la silhouette à tatouer. Ce choix est motivé par la simplicité de la méthode

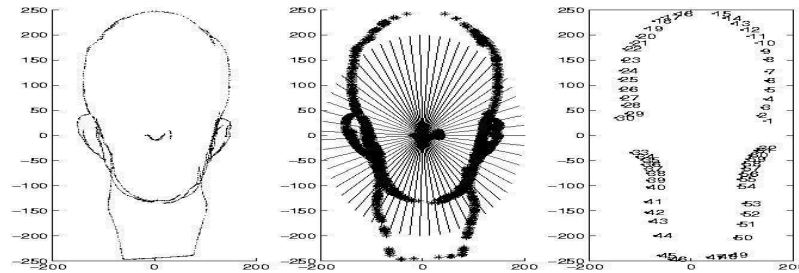


FIG. 1.7 – *Discretisation d'un modèle de visage.*

et la garantie d'extraire toutes les arêtes formant la silhouette. Le temps de calcul optimisé n'étant pas une priorité, d'autant plus que la différence (en terme de temps de calcul) avec les autres techniques de rendu de silhouette décrites ci-dessus est marginal pour des modèles 3D présentant moins de 15000 faces.

1.4 Discretisation de la silhouette

Une fois la silhouette du modèle 3D extraite (voir Session 1.3), une étape de discretisation est nécessaire afin de sélectionner les sommets porteurs de la marque. Ces mêmes sommets doivent être reconsidérés lors du processus d'extraction.

Pour ce faire, on recale la silhouette à discrétiser de sorte que son axe principal coïncide avec l'axe z du repère et on calcule son centre de gravité C_g . On considère par la suite l'ensemble des droites $D_i : a_i x + b_i y + c = 0$ qui passent par C_g . Les deux intersections les plus externes de D_i avec une projection de la silhouette sont les sommets à considérer aussi bien lors du processus d'insertion que d'extraction. Le pas de discrétisation définira le nombre de sommets sélectionnés pour l'insertion de la marque.

La Fig. 1.7 illustre le résultat de discrétisation de la silhouette d'un visage.

1.5 Tatouage

Notre schéma asymétrique de tatouage d'objets 3D repose sur l'emploi d'une technique de marquage de lignes polygonales, à savoir la silhouette de notre modèle. On peut a priori choisir parmi les quelques algorithmes de tatouage de lignes polygonales existants [80] ou bien en développer un qui soit spécialement conçu pour maximiser les performances du tatouage 3D.

Du point de vue tatouage de lignes polygonales, le fait d'être employé dans un contexte de tatouage d'objets 3D impose que l'algorithme de marquage de ligne polygonale ait certaines propriétés.

- La distortion visuelle du tatouage sur la silhouette doit être aussi limitée que possible. Une modification de la silhouette impactera sur la forme globale du modèle $3D$.
- La marque est extraite après rendu du modèle $3D$ dans des images et/ou scènes virtuelles. Il est nécessaire que le tatouage de silhouette soit adapté à une extraction après projection du modèle dans des représentations visuelles $2D$.
- Notre procédé asymétrique de tatouage d'objets $3D$ peut subir un certain nombre d'attaques qui peuvent affecter le modèle $3D$ distribué aux utilisateurs, ou bien encore l'utilisation de l'objet $3D$ dans des représentations visuelles $2D$. La technique de tatouage de ligne polygonale doit tenir compte de la double possibilité d'attaques $3D$ et $2D$. Cette diversité dans les attaques sera détaillée dans le chapitre 2.

1.5.1 Technique aveugle et modèle de projection perspective

Le modèle de projection utilisé, dans un premier temps, est le modèle de projection perspective classique où une projection perspective sur le plan $z = d$ peut être représentée par une matrice de projection définie par :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d & 0 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Il en résulte que pour un sommet $S(x, y, z)$, ses coordonnées projetées sont définies par $S_p = (xd/z, yd/z)$.

Partant de cette hypothèse, nous avons proposé, pour le tatouage de notre silhouette, une adaptation de la technique de Solachidis et al. [93] à notre contexte.

L'algorithme de base de Solachidis et al. considère un contour L_{2D} formé de N sommets définis par $[x_n, y_n]$. Ces coordonnées sont combinées en un signal complexe :

$$s_{2D}(n) = x(n) + i.y(n), \quad n = 0 : N. \quad (1.5)$$

On considère ensuite sa transformée de Fourier :

$$S_{2D}(k) = \sum_{n=1}^N (s_{2D}(n) \cdot \exp((-2\pi jkn/N))). \quad (1.6)$$

La marque est construite comme suit :

$$W(i) = \begin{cases} 0 & i < aN \text{ or } bN < i < (1-b)N \\ & \text{or } (1-a)N < i. \\ W_0(i) & (1-b)N < i < (1-a)N \\ & \text{or } aN < i < bN. \end{cases}$$

avec W_0 une séquence de ± 1 de moyenne nulle et de variance 1. Les paramètres a et b contrôlent les faibles et hautes fréquences qu'affecte le marquage avec $0 < a < b < 0.5$.

Le signal tatoué est défini par :

$$|S_{2D}^*(k)| = |S_{2D}(k)| + p|S_{2D}(k)| \cdot W(k). \quad (1.7)$$

avec p la force de marquage ($p < 1$).

Une Transformée de Fourier Inverse $S_{2D}^*(k)$ donne la ligne marquée L_{2D}^* .

Pour la détection de la marque, soit $|S_{2D}'(k)|$ la transformée de Fourier de la ligne marquée L' . Le calcul de la corrélation c entre la marque W et $|S_{2D}'(k)|$ permet de nous informer de la présence ou pas de la marque.

$$c = \sum \left(W(k) \cdot |S_{2D}'(k)| \right) \quad (1.8)$$

La règle de décision est définie en comparant une valeur normalisée de c , $c' = c/\text{moy}(c)$ par rapport à un seuil proprement choisi T

$$\begin{cases} H_0 : & W \text{ tatoue } L' \text{ si } c' > T \\ H_1 : & W \text{ ne tatoue pas } L' \text{ si } c' < T \end{cases}$$

Nous avons adapté cette technique pour l'appliquer à notre silhouette L_{3D} formée de N sommets $[x_n, y_n, z_n]$. Ces coordonnées sont combinées en un signal complexe :

$$s_{3D}(n) = x(n)/z(n) + i.y(n)/z(n), \quad n = 0 : N. \quad (1.9)$$

Afin de marquer L_{3D} , on remplace dans l'algorithme de base de Solachidis et al. le signal s_{2D} défini dans l'Eq. 1.5 par s_{3D} (Eq. 1.9), on obtient les coordonnées tatouées $(x/z)^*$ et $(y/z)^*$. La silhouette 3D tatouée L_{3D}^* est alors définie par les N sommets :

$$\begin{cases} x_n^* = (x_n/z_n)^* \cdot z_n \\ y_n^* = (y_n/z_n)^* \cdot z_n \\ z_n^* = z \end{cases}$$

Il est à noter que grâce à la formulation adéquate du signal s_{3D} (Eq. 1.9) pour l'insertion/détection de la marque, les propriétés en terme de robustesse aux attaques de translation, rotation et changement d'échelle démontrées en 2D restent valables en 3D.

- La translation de la représentation visuelle 2D affecte uniquement le premier descripteur de Fourier $S_{3D}^*(0)$, en choisissant $a > 0$, la marque est robuste à la translation.

$$\text{Preuve : } s_{3D_t}(n) = s_{3D}(n) + D_x + iD_y, \quad \forall n \in [0, N - 1].$$

$$S_{3D_t}(0) = S_{3D}(0) + N(D_x + iD_y) \text{ et } S_{3D_t}(n) = S_{3D}(n) \quad \forall n \in [1, N - 1].$$

- La rotation d'un angle θ de la représentation visuelle 2D résulte en une multiplication par $\exp(i\theta)$ du signal S_{3D}^* . La norme des descripteurs de Fourier reste invariante. Cet algorithme est alors robuste à la rotation.

$$\text{Preuve : } s_{3D_r}(n) = s_{3D}(n) + \exp^{i\theta}, \quad \forall n \in [0, N - 1].$$

$$S_{3D_r}(n) = S_{3D}(n) \cdot \exp^{i\theta} \rightarrow |S_{3D_r}(n)| = |S_{3D}(n)|, \quad \forall n \in [0, N - 1].$$

- La normalisation du coefficient de corrélation c assure la robustesse au changement d'échelle.

Preuve : $s_{3D_s}(n) = s.s_{3D}(n), \forall n \in [0, N - 1]$.

$S_{3D_s}(n) = s.S_{3D}(n), \forall n \in [0, N - 1]$.

C'est une propriété importante, dans la mesure où elle implique que notre modèle de tatouage est en théorie insensible aux paramètres de projection perspective utilisés (à savoir à la valeur de d Eq. 1.4).

Cet algorithme présente l'avantage d'être aveugle (cela signifie qu'il n'a pas besoin du modèle original pour l'extraction de la marque) et robuste principalement aux attaques de transformations affines. L'inconvénient majeur de la technique est qu'en pratique, elle introduit une distortion visible sur le modèle $3D$.

Il est à signaler que cette faiblesse est déjà présente pour la méthode de base de Solachidis et al., comme illustrée dans les résultats expérimentaux associés à leur article.

1.5.2 Technique non-aveugle et modèle de projection parallèle

Une autre technique de tatouage de lignes polygonales a été explorée. Il s'agit dans ce cas d'un algorithme de tatouage non-aveugle. L'idée de base est inspirée de l'article de Gou et Wu [50].

On a supposé lors de la conception de cette technique que la représentation visuelle du modèle $3D$ est obtenue par projection parallèle sur le plan $z = 0$. La matrice associée à cette projection est définie par :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Il en résulte que pour un sommet $S(x, y, z)$, ses coordonnées projetées sont définies par $S_p = (x, y)$.

Pour cette technique de tatouage de silhouette seules les coordonnées x et y sont considérées pour l'insertion de la marque. Dans l'hypothèse d'une projection perspective, on considère x/z et y/z , par contre lors du processus d'extraction, la connaissance du modèle de projection perspective est, dans ce cas, indispensable.

On applique la technique d'étalement de spectre aux N sommets de la silhouette. Une marque additive (w_x, w_y) de taille $2N$ est ajoutée comme suit :

$$\begin{cases} x_w^* = x + \alpha W_x \\ y_w^* = y + \alpha W_y \\ z_w^* = z \end{cases}$$

avec α la force de marquage et $[x, y, z]$, $[x_w, y_w, z_w]$ les coordonnées des sommets respectivement avant et après le tatouage.

Afin de vérifier si une silhouette est marquée ou non, on calcule la différence entre les coordonnées originales et à tester. On en déduit une estimation de la marque $[W_x^e, W_y^e]$

$$\begin{cases} W_x^e = \frac{(x^e - x)}{\alpha}. \\ W_y^e = \frac{(y^e - y)}{\alpha}. \end{cases} \quad (1.10)$$

Avec $[x^e, y^e]$ les coordonnées de la silhouette à tester.

On calcule par la suite le coefficient de corrélation c entre W et W^e :

$$c = \frac{\sum_{i=1}^{2N} (W_i^e - \mu^e)(W_i - \mu)}{\sqrt{(\sum_{k=1}^{2N} (W_k^e - \mu^e)^2) \sum_{l=1}^{2N} (W_l - \mu)^2}} \quad (1.11)$$

Avec μ et μ^e les moyennes respectives de $W = [W_x, W_y]$ et $W^e = [W_x^e, W_y^e]$.

La règle de décision est définie en comparant c par rapport à un seuil proprement choisi T

$$\begin{cases} H_0 : & W \text{ tatoue } L' \text{ si } c > T \\ H_1 : & W \text{ ne tatoue pas } L' \text{ si } c < T \end{cases}$$

Cette technique est non-aveugle, elle requiert le modèle original pour vérifier la présence ou non de la marque. La distortion introduite par le marquage sur le modèle 3D est visuellement acceptable. Dans sa version détaillée ci-dessus, cette technique est adaptée à une projection parallèle. Nous présenterons dans le chapitre 2 l'impact de considérer une projection perspective.

Pour des raisons d'expérimentation, nous avons utilisé ce dernier algorithme pour le tatouage de silhouette. Outre le fait qu'il respecte les contraintes mentionnées ci-dessus, il est simple à implémenter et facilement intégrable dans notre chaîne de tatouage asymétrique.

1.5.3 Discussion sur le modèle de rendu

Notre algorithme de tatouage asymétrique a la particularité de s'appliquer à des images 2D issues d'objets 3D purement géométriques. Les secteurs visés regroupent entre autre le secteur de l'industrie mécanique pour modéliser des pièces automobiles, le secteur médical où le moulage plâtré d'un patient peut être supplanté par des techniques de modélisation 3D, etc.

Il est aisé d'admettre qu'un rendu 2D de l'objet dans des images doit préserver la forme de l'objet et ses proportions.

Partant de ces hypothèses, le choix de modèle de projection parallèle (Vs projection perspective) pour rendre l'objet dans des images ou scènes virtuelles s'avère plus adapté.

1.6 Choix de vues caractéristiques

Comme déjà mentionné dans le paragraphe 1.2, une seule vue $2D$ d'un objet ne représente généralement qu'une information partielle du modèle $3D$. Si on veut recouvrir au mieux le modèle $3D$ et augmenter les chances d'extraction de la marque des vues $2D$, il est nécessaire de considérer différentes silhouettes (c.-à-d. différents points de vue) au cours du processus d'insertion. Le choix de ces vues a une influence importante sur les performances et les limites de notre approche.

Ces vues doivent satisfaire deux contraintes antagonistes :

1. Elles doivent couvrir au mieux le modèle $3D$.
2. Leur nombre doit être limité afin d'éviter un possible recouvrement conflictuel de fragments de signaux marqués.

La sélection de vues caractéristiques à partir d'un modèle $3D$, est une problématique inhérente dans le domaine de la vision par ordinateur. Elle est souvent rattachée à la reconnaissance et l'indexation $3D$. On cherche à identifier ou classer un modèle $3D$ à partir de ses représentations $2D$. Mais quel est le nombre optimal de vues caractéristiques qu'on doit associer à un modèle $3D$? et selon quelles positions ?

Un état de l'art sur les principales techniques de sélection de vues caractéristiques, montre assez vite qu'il existe une répartition des algorithmes dans deux classes principales : statiques et dynamiques.

Méthodes statiques

Une méthode statique représente un modèle $3D$ avec un nombre fixe de vues caractéristiques.

Dans cette catégorie, Chen et al. [30] associent à chaque modèle, huit vues caractéristiques. Ils utilisent une facétisation simple de la sphère englobante d'un modèle. Cette sphère est facétisée en huit faces triangulaires. La caméra est positionnée au centre de chaque face et dirigée vers le centre de la sphère pour obtenir les huit vues.

Abbasi et al. [3] fixent le nombre de vues caractéristiques associées à un modèle à neuf vues, dont quatre standard à savoir une vue de dessus, une de côté une de face et une arrière. Les cinq autres vues sont intermédiaires.

Mahmoudi et al. [72] utilisent les axes principaux du modèle $3D$ pour calculer les vues caractéristiques. Ces axes sont calculés grâce aux valeurs propres de la matrice de covariance de son nuage de points. Trois vues caractéristiques sont sélectionnées selon ces trois axes, quatre autres vues secondaires sont prises entre ces axes, et une huitième vue entre les trois vues secondaires.

Méthodes dynamiques

Une méthode dynamique représente un modèle tridimensionnel avec un nombre de vues variables, en fonction de la complexité géométrique du modèle.

Dans cette catégorie, Mokhtarian et al. [78] proposent une méthode qui élimine les vues similaires au sens d'une distance entre *CSS* (Curvature Scale Space) des contours de ces vues. Le nombre de vues sélectionnées varie entre 5 et 25 en fonction du degré de complexité du modèle.

Dorai et al. [40] génèrent 320 vues à partir de leur modèle 3D. À chaque vue est associé un spectre de courbure. Il s'agit de calculer un index de courbure en chaque point p de la surface d'intensité définie par $(x, y, I(x, y))$. Une classification hiérarchique basée sur une mesure de distance entre les spectres de courbures des 320 vues permet de garder entre 9 et 16 vues selon la complexité de l'objet.

Ansary et al. [7] proposent un score de distribution statistique du modèle 3D pour déterminer le nombre optimal de vues caractéristiques.

Méthode dynamique basée sur le paramètre aire

Pour notre problématique de tatouage, nous avons proposé notre propre approche de sélection dynamique de vues caractéristiques. Le critère considéré pour cette sélection est l'aire définie par une silhouette du modèle 3D. Cette technique est simple à implémenter et facilement productible. Plusieurs tests et simulations ont montré que pour divers objets les vues caractéristiques sont sélectionnées correctement et efficacement.

L'idée de base est d'éliminer les vues similaires et de ne garder qu'un nombre limité d'images 2D obtenues pour différents angles vues. Ce nombre est calculé automatiquement et dépend étroitement de la complexité de l'objet 3D.

Étant donné un objet 3D, l'algorithme de sélection de vues caractéristiques est alors le suivant :

1. On recale le modèle 3D selon le repère formé par ses axes principaux d'inertie⁴
2. On considère des projections de l'objet à des intervalles réguliers (Ex. 2^o) suivant une ou plusieurs directions afin de générer un ensemble de vues 2D (voir Fig. 1.8).
3. On calcule l'aire A de chaque vue 2D :

$$\begin{cases} A : \text{Views} \rightarrow]0, 1[\\ V_k \rightarrow A(V_k). \end{cases}$$

Si on considère une vue 2D binaire V_k de taille $H \times W$ (0 pour le fond et 1 pour les pixels de l'objet), l'aire est calculée comme suit :

$$A(V_k) = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W V_k(i, j) \quad (1.12)$$

⁴La technique communément utilisée est l'Analyse en Composante Principale. Le principe de base est étant donné une surface triangulée S en 3D. La matrice de covariance est définie par $M_{ij} = \sum_{T \in S} \int_T x_i x_j dx$, où T parcourt les triangles du modèle. Les trois vecteurs propres de la matrice M sont les axes principaux d'inertie du modèle.

4. On sélectionne les vues candidates V_k correspondant au minimum et maximum locaux de la fonction A (voir Fig. 1.9). Ces vues satisfont la relation

$$(A(V_{k-1}) - A(V_k))(A(V_k) - A(V_{k+1})) < 0 \quad (1.13)$$

5. On classe les vues sélectionnées V_k selon leurs aires dans un ordre décroissant.
 6. On place la vue V_0 (présentant l'aire maximale) dans l'ensemble C des vues caractéristiques.
 7. Une vue V_k ($k > 0$) est déclarée comme vue caractéristique (rajoutée à l'ensemble C) si

$$\{\forall V \in C, \quad |A(V_k) - A(V)| > T\} \quad (1.14)$$

T définit à partir de quelle valeur deux vues sont jugées similaires.

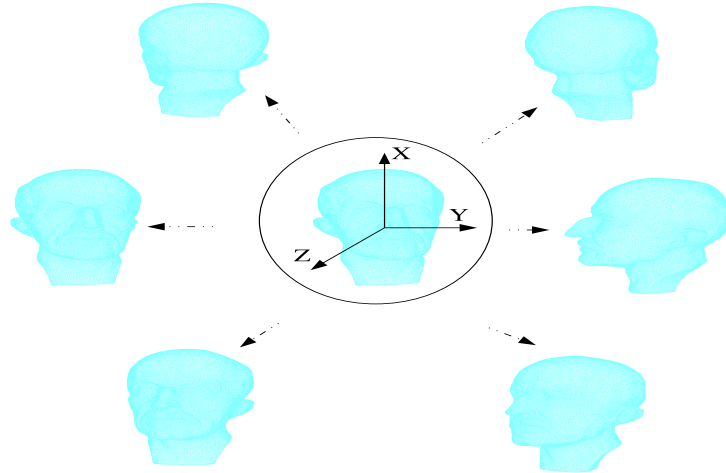


FIG. 1.8 – Générations de vues 2D à partir du modèle 3D.

La figure Fig. 1.10 montre quelques exemples de vues sélectionnées pour 5 modèles différents. Les projections sont prises tous les 2° après rotation suivant l'axe vertical. Le seuil T est dans ce cas fixé à 0.01. Le nombre de vues caractéristiques varie entre 1 et 5 et dépend étroitement de la complexité du modèle 3D. On note par exemple, qu'une seule vue est suffisante pour présenter une sphère, comme elle présente la même apparence sous n'importe quel angle. Par contre, la représentation d'un cheval nécessite 5 vues.

On peut appliquer le même algorithme pour une rotation suivant l'axe Y , et ensuite combiner les résultats par une simple union. Une rotation suivant l'axe Z donne la même vue modulo une rotation 2D.

On tient à préciser que cet algorithme n'est pas dédié à une application d'indexation ou de reconnaissance d'objets 3D. Il s'agit d'une utilisation pour notre chaîne

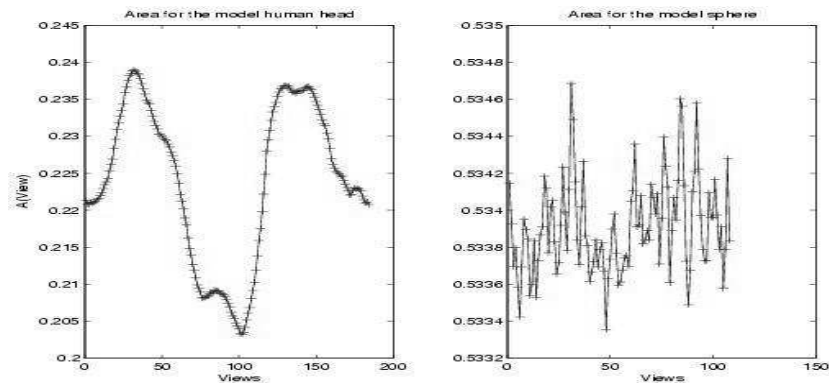


FIG. 1.9 – Graphe d’aire pour le modèle 3D de tête humaine (droite) et de sphère (gauche). Les vues sont sélectionnées après rotation de 2° suivant l’axe vertical. Pour le modèle de la sphère, les variations sont marginales (il est à noter que les deux figures n’ont pas même échelle).

de tatouage. L’intérêt est de sélectionner à partir d’un modèle 3D les vues les plus pertinentes, celles qui ont une plus grande probabilité d’apparaître dans des images ou scènes virtuelles. En d’autres termes, on cherche à maximiser la probabilité d’extraction de la marque à partir d’une représentation 2D de l’objet.

1.7 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous soulignons que l’approche que nous avons développée enfouit le tatouage dans la silhouette du modèle 3D, ce qui suppose qu’il peut s’agir d’un objet 3D réaliste ou du moins riche en texture ou bien encore d’un objet purement géométrique issu de la CAO. Le tatouage peut alors être extrait des vues 2D de l’objet dans lesquelles l’information de silhouette tatouée est présente.

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux solutions pour tatouer les silhouettes de notre modèle 3D. La première méthode a l’avantage d’être aveugle. Cependant, il reste à résoudre le problème de distortion visuelle pour pouvoir pleinement tirer partie du potentiel de cette approche.

La deuxième méthode que nous avons présentée se différencie de la première dans la mesure où elle nécessite l’objet 3D pour l’extraction de la marque. Par contre elle donne de bien meilleurs résultats que la précédente en terme de visibilité. Nous avons opté pour cette deuxième technique pour valider notre chaîne complète de tatouage asymétrique 3D/2D.

Pour les besoins de notre approche de tatouage, nous avons développé un algorithme de sélection de vues caractéristiques à partir d’un modèle 3D. L’expérimentation de la méthode sur une sélection de modèles 3D montre des résultats assez satisfaisants.

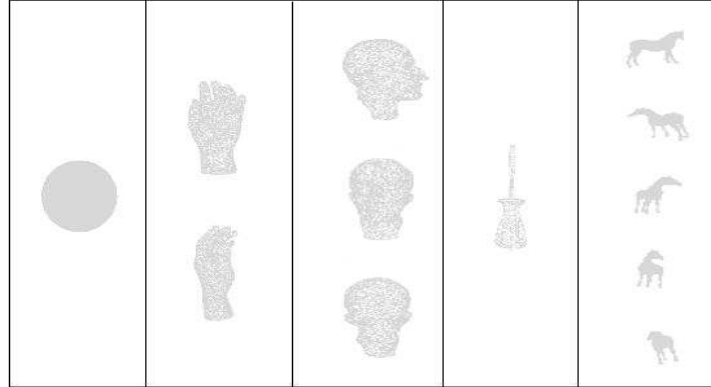


FIG. 1.10 – *Vues caractéristiques de 5 modèles différents sélectionnées par notre algorithme basé sur le paramètre aire. De gauche à droite : sphère, main, tête humaine, tournevis et cheval. Ces vues sont obtenues après rotation uniquement suivant axes vertical x .*

Il est encore possible d'améliorer l'algorithme actuel de tatouage asymétrique par l'utilisation d'un algorithme de tatouage de ligne polygonale avec de meilleures performances.

L'objectif principal derrière ces travaux est de valider l'idée de protection de l'utilisation de l'objet $3D$ plutôt que l'objet $3D$ lui-même, et cela pour des modèles avec ou sans texture.

2

Évaluation des performances

2.1 Introduction

Tout algorithme et en particulier ceux dédiés à la sécurité, doivent être soumis à une évaluation de performance. [62]

Nous exposons dans ce chapitre l'ensemble des expériences que nous avons mené afin d'évaluer notre approche de tatouage asymétrique $3D/2D$. Concrètement, nous avons défini trois classes d'expériences.

1. Un premier ensemble de tests dit 'expériences de référence', nous sert de point de repère car effectué dans des conditions idéales. Il représente la limite supérieure des performances qu'on peut attendre de notre procédé.
2. La deuxième classe d'expériences considère un contexte d'application plus réaliste.
3. Pour la troisième classe de tests, nous avons mené plusieurs expériences afin d'estimer les performances de notre approche en présence de manipulations malveillantes ou non.

2.2 Expériences de référence

La première expérience dite de référence que nous avons menée consiste à tatouer les silhouettes de l'objet $3D$ associées à ses vues caractéristiques, à projeter l'objet suivant une direction du regard qui correspond exactement à l'une de ces vues caractéristiques, et enfin à extraire le tatouage de la vue projetée.

Le modèle de projection utilisé est celui de projection parallèle. On suppose que l'objet est projeté sur un fond uniforme. On ne traite pas le problème de détection de la représentation visuelle de l'objet dans une scène complexe.

Cette expérience a pour but de servir de point de comparaison pour toutes les expériences suivantes ainsi que de fournir une première évaluation des performances limites qu'on peut espérer atteindre par notre algorithme. En effet, dans la mesure où on projette l'objet suivant l'une des vues caractéristiques considérées lors du processus d'insertion, sans qu'aucune attaque ne s'intercale, on se place dans les meilleures conditions possibles et les performances mesurées dans ces conditions sont réellement une borne supérieure de ce qu'on pourra obtenir dans des conditions plus réalistes.

Pour ces expériences, nous avons considéré deux objets $3D$ différents.

2.2.1 Premier objet

La figure Fig. 2.1 montre l'un des deux modèles que nous avons utilisé pour nos expériences. Il s'agit d'un modèle de visage humain représenté par un maillage triangulaire avec 49132 sommets et 98260 faces. La figure Fig. 2.2 illustre les vues caractéristiques associées à ce modèle ainsi que les silhouettes correspondantes.

Les silhouettes sont tatouées avec l'algorithme de tatouage non-aveugle proposé à la session 1.5.2. Cent six sommets par silhouette sont utilisés pour l'insertion de la marque. Ces sommets sont sélectionnés après discrétisation de la silhouette (cf.

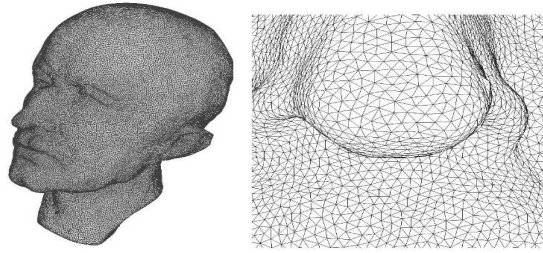


FIG. 2.1 – Modèle de visage humain formé 49132 sommets et 98260 faces (gauche) et zoom sur le maillage 3D du même modèle (droite).

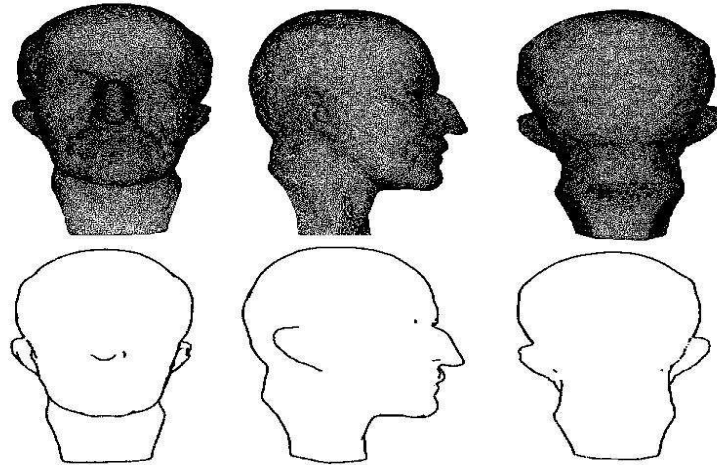


FIG. 2.2 – Vues caractéristiques du modèle de visage humain avec leurs silhouettes associées.

session 1.4). La marque rajoutée est d'amplitude variable entre -0.3 et 0.3. L'objet 3D est rendu selon le modèle de projection parallèle dans une image 2D de taille 616x1005. La boîte englobante associée à ce modèle est définie par :

$$\begin{aligned} x &= -30.2868 \dots 30.271 \\ y &= -49.4664 \dots 49.9991 \\ z &= -42.8022 \dots 34.0036 \end{aligned}$$

Pour nos mesures de performance, nous avons généré 10^4 bonnes et 10^4 mauvaises marques. On regroupe ainsi un ensemble de 10^4 cas où la marque est présente et 10^4 cas où la marque est absente.

À partir de ces données, on représente dans la Fig. 2.3 les histogrammes de corrélation calculés pour les cas de présence et d'absence de marque.

Pour chacun de ces deux ensembles (présence, absence), on calcule leur moyenne

μ et écart type σ et on définit la distribution gaussienne associée :

$$f(x) = A * \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.1)$$

la distribution gaussienne de paramètres μ et σ est notée $N(\mu, \sigma^2)$.

Les traits discontinus de la Fig. 2.3 illustrent que les distributions gaussiennes $N(0.8960, 0.0278^2)$ et $N(-0.0015, 0.0681^2)$ présentent une bonne approximation des histogrammes de corrélation obtenus respectivement dans les cas de présence et d'absence de marque.

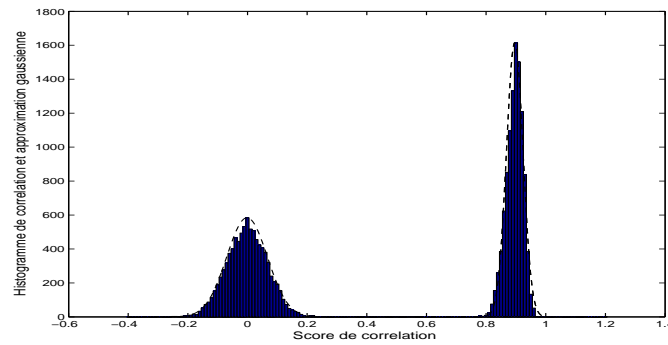


FIG. 2.3 – Résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f) : Histogramme de corrélation pour les cas de présence et d'absence de marque et leur approximation gaussienne $N(0.8960, 0.0278^2)$ et $N(-0.0015, 0.0681^2)$.

On note que la distribution gaussienne avec une moyenne proche de 1 approxime les cas de présence de marque. Dans le cas d'absence de marque, l'approximation gaussienne présente une moyenne proche de 0.

À partir de ces données, on dresse le tableau Tab. 2.1 résumant les résultats obtenus en terme de probabilité de fausse alarme P_{FA} et de faux rejet P_{FR} .

D'un point de vue analytique, après approximation gaussienne, ces deux probabilités sont définies par :

$$P_{FR} = \text{erf}\left(\frac{T - \mu_T}{\sigma_T}\right) + \frac{1}{2}. \quad (2.2)$$

$$P_{FA} = -\text{erf}\left(\frac{T - \mu_I}{\sigma_I}\right) + \frac{1}{2}. \quad (2.3)$$

$$EER = P_{FA} = P_{FR} = \text{erf}\left(\frac{\mu_I - \mu_T}{\sigma_I + \sigma_T}\right) + \frac{1}{2}. \quad (2.4)$$

avec T le seuil de détection, (μ_T, σ_T) et (μ_I, σ_I) les couples de paramètres (moyenne, écart type) des gaussiennes approximant respectivement les cas de présence et d'absence de la marque.

D'un point de vue expérimental, pour calculer l'EER d'un algorithme de tatouage, on fait varier le seuil de décision T , on calcule les taux de Fausses Alarmes (FA) et de Faux Rejets (FR) correspondants. À partir de ces données on trace les courbes T-FA et T-FR. L'EER expérimental est géométriquement l'intersection de ces deux courbes (voir 1^{ère} partie Fig. 1.7).

Une autre façon de faire consiste à tracer la courbe ROC (la courbe FR-FA). L'EER correspond graphiquement à l'intersection de la courbe ROC avec la première bissectrice (voir 1^{ère} partie Fig. 1.8).

La figure Fig. 2.4 montre les courbes T-FA et T-FR obtenu pour cette expérience.

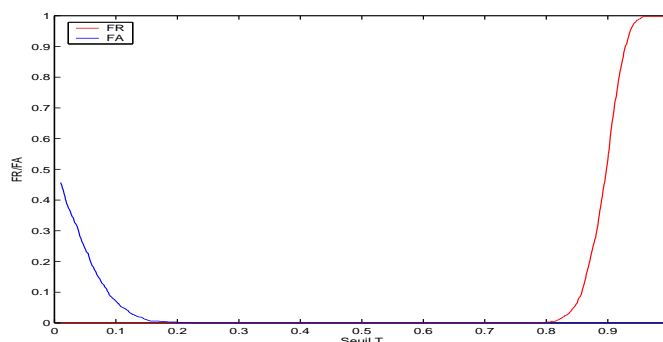


FIG. 2.4 – Résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f) : Courbe T-FA et T-FR.

L'EER analytique associé à cette expérience est de l'ordre de 10^{-10} . L'EER expérimental est égale à 0.

Seuil	Mesure	0.2	0.4	0.6	0.8
P_{FR}	expérimental	0	0	0	1.4×10^{-3}
P_{FR}	approx. gaussienne	2.36×10^{-25}	2.27×10^{-23}	8.92×10^{-20}	1.1×10^{-3}
P_{FA}	expérimental	2×10^{-3}	0	0	0
P_{FA}	approx. gaussienne	1.5×10^{-3}	1.86×10^{-9}	5.13×10^{-19}	1.03×10^{-21}

TAB. 2.1 – Résultats expérimentaux des performances de détection et leur approximation gaussienne.

Pour ce même modèle, une version simplifiée a été considérée. On a divisé par 10 le nombre de polygones du maillage. Le nouveau modèle est représenté par 5002

sommets et 10000 faces. Là encore les résultats sont répartis de manière similaire. Le cas de présence de marque est approximé par une gaussienne $N(0.7315, 0.0531^2)$ et d'absence par une gaussienne $N(0.0032, 0.0712^2)$.

2.2.2 Deuxième objet

Pour vérifier la validité des résultats précédents, nous avons effectué les mêmes expériences mais en utilisant un objet 3D différent. Il s'agit d'un modèle de main représenté par un maillage triangulaire avec 38219 sommets et 76438 faces (voir Fig. 2.5). La figure Fig. 2.6 illustre les vues caractéristiques associées à ce modèle ainsi que les silhouettes correspondantes. L'extraction se fait à partir d'une image 2D de taille 884x2031. L'enveloppe englobante associée à ce modèle est défini par :

$$\begin{aligned}x &= -44.84 \dots 42.54 \\y &= -101.38 \dots 100.24 \\z &= -37.05 \dots 38.76\end{aligned}$$

La marque ajoutée aux sommets est d'amplitude variant entre -0.3 et 0.3.

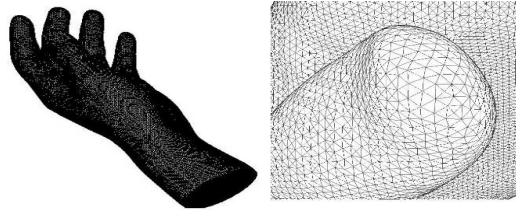


FIG. 2.5 – *Modèle d'une main formé de 38219 sommets et 76438 faces (gauche) et zoom sur le maillage 3D (droite).*

La Fig. 2.7 montre les résultats obtenus. Les distributions gaussiennes $N(0.0016, 0.06^2)$ et $N(0.7, 0.04^2)$ approximent respectivement les cas d'absence et de présence de marque. L'EER analytique associé à cette expérience est de l'ordre de 10^{-9} . L'EER expérimentale est égale à 0.

Les expériences de référence conduites dans un contexte idéal, sur deux objets différents ont abouti à des résultats assez satisfaisants. Lors d'expériences ultérieures, nous étudierons l'évolution de ces performances dans un contexte plus réaliste.

2.3 Expérience dans des conditions plus réalistes

Dans cette série d'expériences, on cherche à évaluer à quel point les performances de notre algorithme se dégradent dans des conditions plus réalistes et moins idéales que l'expérience de référence.

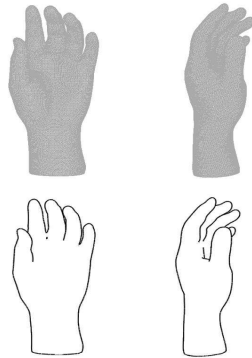


FIG. 2.6 – *Vues caractéristiques du modèle de main humaine avec leurs silhouettes associées.*

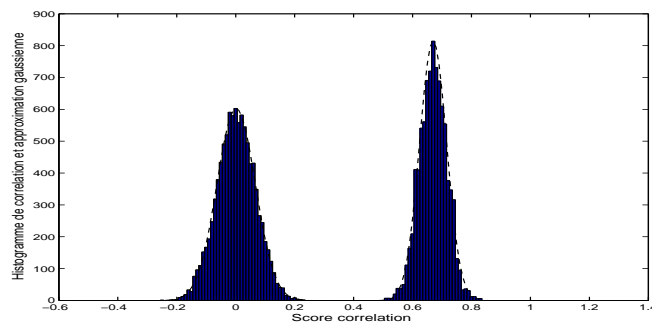


FIG. 2.7 – *Résultats d'extraction à partir du modèle de main (38219 s, 76438 f) : Histogramme de corrélation pour les cas de présence et d'absence de marque et leur approximation gaussienne $N(0.7, 0.04^2)$ et $N(0.0016, 0.06^2)$.*

2.3.1 Rendu imprécis

Dans les expériences dites de référence, on suppose que l'objet $3D$ est rendu selon une représentation visuelle qui coïncide parfaitement avec l'une des vues marquées. Cette hypothèse rend l'application de notre algorithme peu réaliste. Il est clairement plus probable, de récupérer une vue $2D$ de l'objet légèrement différente de celle considérée pour le marquage que la même vue exactement. On cherche dans cette première expérience dite réaliste à mesurer la sensibilité de notre algorithme face à un rendu de l'objet suivant une vue $2D$ légèrement différente de celle considérée lors du processus d'insertion.

Pour cela, nous utilisons le même protocole que pour l'expérience de référence, sauf que l'objet $3D$ (le modèle de visage humain) est rendu dans une scène virtuelle suivant un angle de vue peu différent des vues caractéristiques considérées pour l'insertion. La

Fig. 2.8 montre les résultats obtenus pour des angles de rotation de $(0.1^\circ X, 0.05^\circ Y)$, $(0.2^\circ X, 0.1^\circ Y)$ et $(1^\circ X, 0.5^\circ Y)$ (X et Y signifient respectivement rotation autour de l'axe X et de l'axe Y). La même expérience a été conduite pour des angles de $(0.5^\circ X, 0.25^\circ Y)$ et $(2^\circ X, 1^\circ Y)$. Le tableau Tab. 2.2 récapitule les résultats obtenus. Il en résulte que pour une rotation d'angle $(1^\circ X, 0.5^\circ Y)$ l'extraction de la marque avec un faible EER est toujours possible.

Modèle 3D	Angle de rotation	EER expérimentale	EER analytique
Visage Humain	$(0.1^\circ X, 0.05^\circ Y)$	0	1.42×10^{-6}
	$(0.2^\circ X, 0.1^\circ Y)$	0	5.5×10^{-6}
	$(0.5^\circ X, 0.25^\circ Y)$	0	5.22×10^{-5}
	$(1^\circ X, 0.5^\circ Y)$	3×10^{-4}	2.78×10^{-4}
	$(2^\circ X, 1^\circ Y)$	2.4×10^{-3}	1.5×10^{-3}

TAB. 2.2 – Impact d'un rendu imprécis sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f).

2.3.2 Recouvrement de marques

Plutôt que de se limiter aux vues caractéristiques du modèle 3D pour enfouir la marque, on considère N vues séparées par une rotation d'angle δ autour de l'axe X ($N = 360/\delta$). L'objet 3D est rendu (dans une image 2D de taille 616x1005) suivant l'une des N vues sélectionnées pour l'insertion.

Cette expérience vise à étudier l'éventuel recouvrement entre les différentes marques, et d'estimer le nombre maximal de vues à tatouer.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau Tab. 2.3. Lors de cette expérience on a fait varier la valeur de δ et par conséquent le nombre N de vues. Les silhouettes sont tatouées avec des marques différentes.

On constate que pour le cas de visage humain, il est possible de tatouer tous les 2° de rotation suivant l'axe X . L'EER obtenu dans ce cas de figure est de l'ordre de 10^{-4} . Par ailleurs, il est clair que le marquage d'un nombre important de vues a un impact sur la qualité du modèle 3D tatoué.

Modèle 3D	Angle de rotation	Nombre de vues	EER expérimental	EER analytique
Visage humain	10°	36	0	1.25×10^{-9}
	5°	72	0	3.23×10^{-8}
	3°	120	0	2.02×10^{-7}
	2°	180	2×10^{-4}	10^{-4}
	1°	360	6.3×10^{-3}	1.5×10^{-3}

TAB. 2.3 – Tatouage de plusieurs vues du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f).

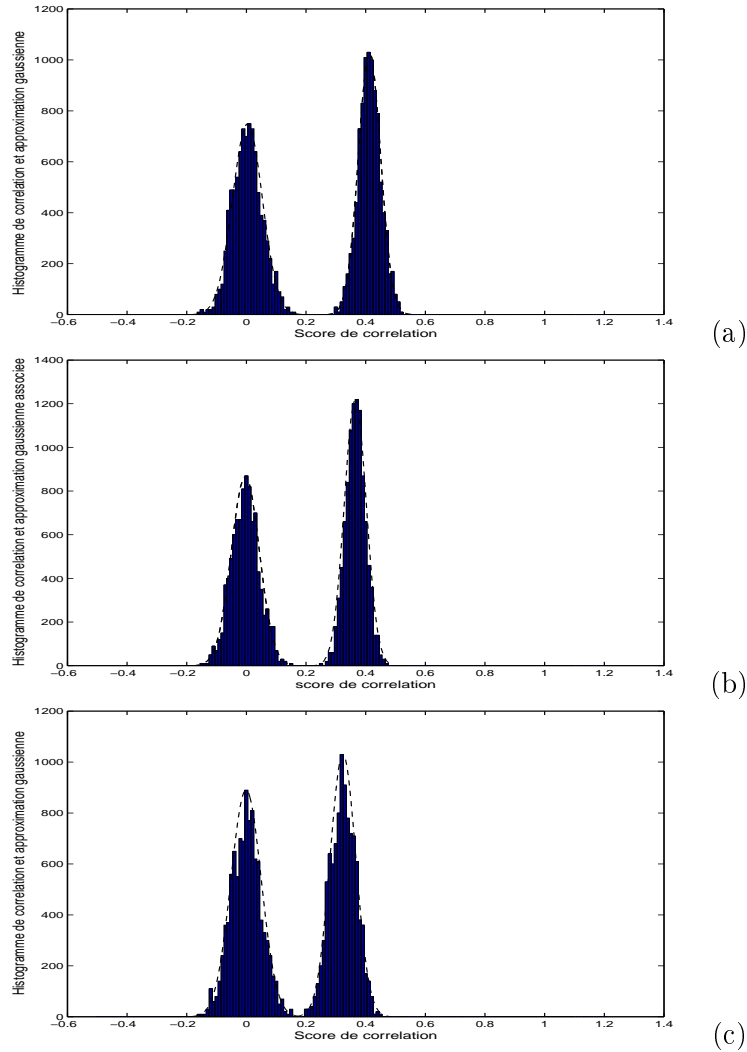


FIG. 2.8 – Impact d'un rendu imprécis sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f) : Histogramme de corrélation et leur approximation gaussienne. (a) cas d'une rotation de $(0.1^\circ X, 0.05^\circ Y)$ avec les approximations gaussiennes $N(0.41, 0.0373^2)$ et $N(0.0036, 0.0501^2)$ respectivement pour les cas de présence et d'absence de marque. (b) cas d'une rotation de $(0.2^\circ X, 0.1^\circ Y)$ avec les approximations gaussiennes $N(0.36, 0.0371^2)$ et $N(-0.0035, 0.0468^2)$ respectivement pour les cas de présence et d'absence de marque. (c) cas d'une rotation de $(1^\circ X, 0.5^\circ Y)$ avec les approximations gaussiennes $N(0.32, 0.0433^2)$ et $N(-0.0001, 0.0508^2)$ respectivement pour les cas de présence et d'absence de marque.

2.3.3 Projection non-linéaire

Dans toutes les expériences décrites précédemment, on suppose que la projection utilisée pour le rendu du modèle 3D est une projection parallèle. En d'autres termes, le centre de projection est supposé à l'infinie et les coordonnées projetées d'un sommet $S(x, y, z)$ sont définies par $S_p(x, y)$. Ce choix est justifié à la session 1.5.3.

Cette expérience vise à mesurer l'impact de considérer une projection perspective pour le rendu de l'objet. Le centre de projection est situé à une distance finie d de l'objet et les coordonnées projetées d'un sommet $S(x, y, z)$ sont définies par $S_p(xd/z, yd/z)$.

Plus simplement, cela revient à estimer la distance d du centre de projection à partir de laquelle on peut considérer que notre modèle est à l'infini. Pour cela, on utilise le même protocole que pour l'expérience de référence sauf que la représentation visuelle de l'objet est obtenue via une projection perspective. On fait varier la distance d du centre de projection et on examine l'impact sur les performances d'extraction. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau Tab 2.4. On constate que les performances décrochent pour une distance $d \leq 10^3$

objet utilisé	distance d	EER expérimentale	EER analytique
Visage humain	5×10^2	8×10^{-2}	10^{-2}
	10^3	10^{-2}	$8 * 10^{-3}$
	$1.5 * 10^3$	8×10^{-4}	4×10^{-4}
	$3 * 10^3$	0	1.7×10^{-5}
	$5 * 10^3$	0	7.23×10^{-6}

TAB. 2.4 – Impact d'une projection perspective sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f).

On rappelle que l'enveloppe englobante du modèle de visage humain est définie par :

$$\begin{aligned} x &= -30.2868 \dots 30.271 \\ y &= -49.4664 \dots 49.9991 \\ z &= -42.8022 \dots 34.0036 \end{aligned}$$

Une distance d de 10^3 présente approximativement dix fois la taille de l'objet.

2.4 Expérience dans un contexte avec attaques

Notre procédé asymétrique de tatouage d'objets 3D peut subir des manipulations malveillantes ou non qui peuvent mettre en défaut l'extraction de la marque à partir des représentations visuelles 2D. Il est à noter que ces attaques peuvent intervenir lors des deux étapes suivantes (voir Fig. 2.9).

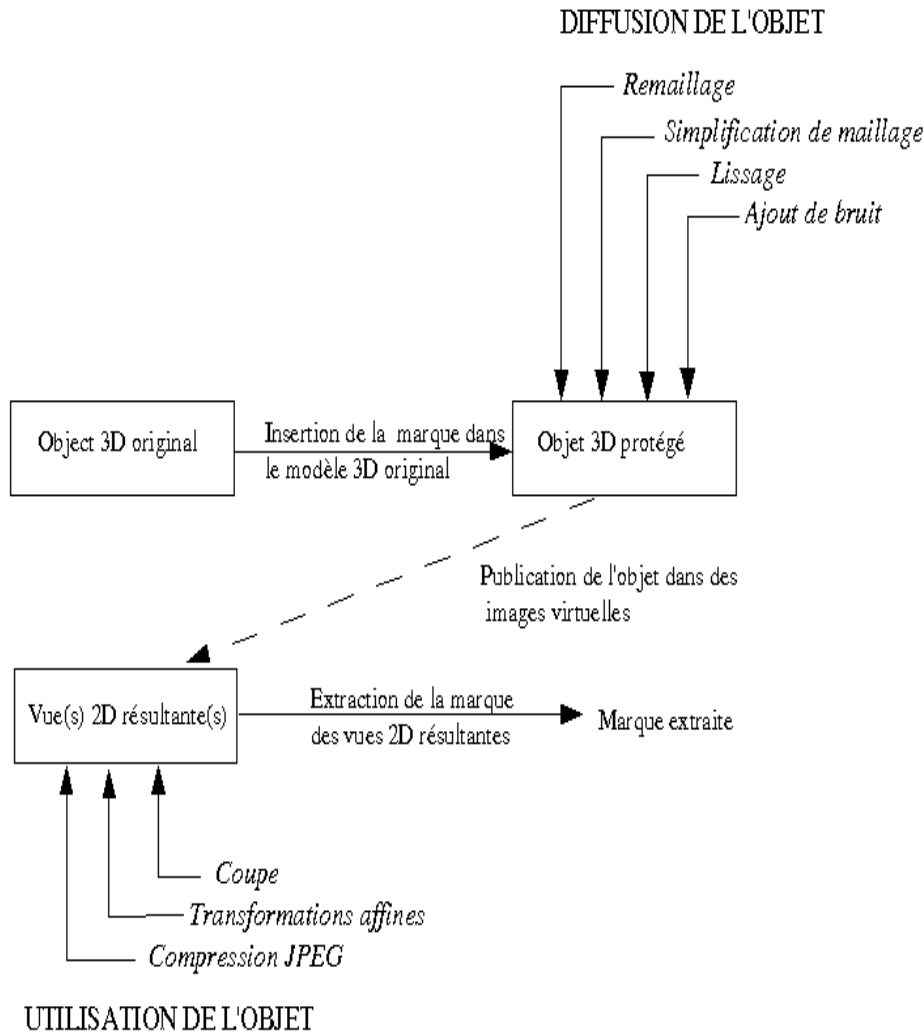


FIG. 2.9 – Inventaire des attaques pouvant affecter notre procédé asymétrique de tatouage d'objets 3D.

2.4.1 Diffusion de l'objet

Après tatouage, l'objet 3D est diffusé à des utilisateurs. À ce moment ces derniers peuvent opérer des manipulations bienveillantes (ex. modifications d'orientations) ou bien tenter de retirer la marque ou tout simplement d'empêcher son extraction (ex. découpe). Il s'agit dans les deux cas, de manipulations du modèle 3D lui-même.

Nous étudierons dans ce paragraphe, l'impact d'une sélection de manipulations 3D sur notre approche de tatouage. Nous utilisons le même protocole que pour l'expérience de référence sauf qu'avant de publier l'objet dans des images ou scènes virtuelles

on lui fait subir les attaques suivantes :

1. Ajout de bruit :

Cette attaque consiste à ajouter un bruit aléatoire aux coordonnées du maillage une fois tatoué. Ce bruit peut être introduit malicieusement pour mettre en défaut l’algorithme de tatouage ; ou bien encore au cours d’une manipulation classique de l’objet, à savoir lors d’une compression avec pertes ou d’une conversion de format.

Les résultats du tableau Tab. 2.5 montrent qu’un ajout de bruit d’amplitude inférieur à 0.5 ne met pas en défaut notre technique de tatouage.

objet utilisé	Amplitude du Bruit	EER expérimentale	EER analytique
Visage humain	1	10^{-1}	10^{-1}
	0.7	10^{-2}	$5 * 10^{-3}$
	0.5	2×10^{-3}	8×10^{-3}
	0.2	3×10^{-4}	6×10^{-5}

TAB. 2.5 – Impact d’un ajout de bruit sur les résultats extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f). On ajoute (Amplitude du bruit) \times (longueur de l’arête) à chaque coordonnées x, y et z du maillage.

Il est important de préciser que l’impact sur la géométrie de l’objet d’ajouter un bruit aléatoire d’amplitude 0.5 est comparable aux déplacements des sommets générés par le processus de tatouage.

2. Lissage :

À la réception du modèle 3D, certains utilisateurs tentent d’améliorer la qualité du maillage tout en conservant la topologie inchangée. Pour vérifier l’impact d’une telle manipulation sur la fiabilité de l’extraction, nous avons procédé à un lissage de notre modèle tatoué avant de le rendre dans des images ou scènes virtuelles. Pratiquement, nous avons appliqué à notre modèle de visage humain une fois tatoué n itérations de l’opérateur de lissage Umbrella *Umbrella-operator smoothing*. Il ressort des résultats du tableau Tab. 2.6 que notre approche est robuste à une seule itération de l’opérateur de lissage Umbrella. Les performances décrochent pour un nombre d’itérations supérieur à 1.

3. Simplification de maillage :

Une propriété souhaitable des algorithmes de tatouage est d’être robuste à une simplification de maillage. Pour étudier cette propriété dans le cas de notre algorithme nous avons procédé à une simplification de maillage de l’objet 3D tatoué et tenté d’extraire la marque à partir d’une représentation 2D. Plus précisément, on tatoue l’objet 3D de l’expérience de référence (voir Fig. 2.1), dont la

objet utilisé	Nombre d'itérations	EER expérimentale	EER analytique
Visage humain	1	$4 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
	2	10^{-2}	$9 \cdot 10^{-3}$

TAB. 2.6 – Impact de l'opérateur de lissage *Umbrella* sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f).

géométrie est décrite par 98260 triangles, puis on effectue une simplification de maillage⁵ de l'objet 3D et on génère une vue 2D à partir de l'objet 3D tatoué simplifié.

La Fig. 2.10 résume les résultats obtenus. On a généré pour l'extraction 1000 clés différentes. La clé #100 est celle utilisée lors du processus d'insertion. On constate que lorsque la complexité de l'objet est réduite à 10000 triangles, la robustesse est affectée. Ceci peut s'expliquer intuitivement par l'observation que l'image 2D résultante est une version sensiblement déformée de la vue originale (Fig. 2.11). En d'autres termes pour une simplification de maillage aussi sévère, la géométrie globale de l'objet n'est plus conservée.

4. Inversement d'arêtes :

Dans un but d'amélioration de la qualité du modèle 3D, quelques utilisateurs modifient la topologie et plus particulièrement ils inversent la position de certaines arêtes de sorte qu'ils minimisent l'angle maximal dans un triangle donné (v_1, v_2, v_3) . L'effet d'une telle manipulation n'a pas trop d'impact sur les performances de notre algorithme. L'EER analytique est de l'ordre de 10^{-8} et l'EER expérimental est égal à 0.

2.4.2 Utilisation de l'objet

Après rendu du modèle 3D dans des images ou scènes virtuelles, ces dernières peuvent subir des manipulations. Il s'agit d'attaques classiques d'images fixes. On peut imaginer que la représentation 2D de l'objet subit une transformation affine (combinaison de translation, rotation et changement d'échelle), une découpe, un bruitage, etc.

Nous étudions brièvement dans ce paragraphe l'impact de telles manipulations sur les performances d'extraction. Nous utilisons le même protocole que pour l'expérience de référence sauf qu'après publication de l'objet dans des images ou scènes virtuelles, ces dernières subissent les attaques suivantes :

1. Transformations affines :

Face à une transformation affine de l'une des vues caractéristiques du modèle

⁵Les opérations de simplification de maillage ont été réalisées à l'aide du logiciel QSLim

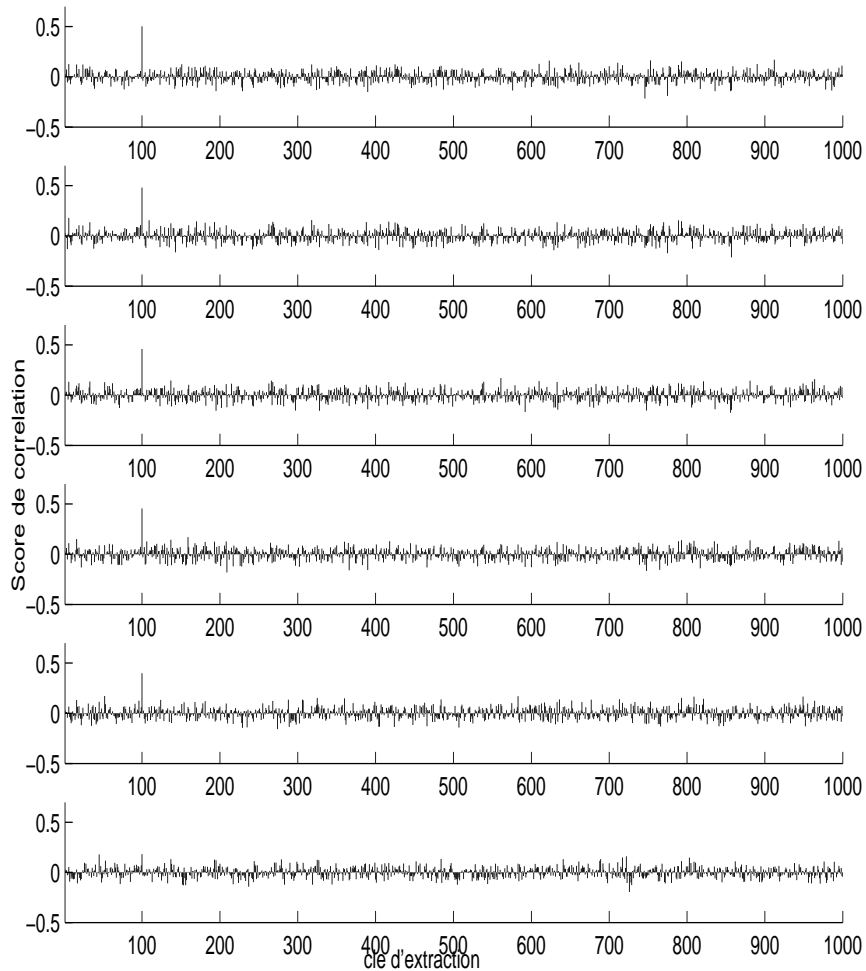


FIG. 2.10 – Extraction de la marque après simplification de maillage du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f) tatoué. La clé #100 est la bonne clé. De haut en bas la paire (nombre de sommets, nombre de triangles) est égale à (40002, 80000), (35002, 70000), (30002, 60000), (25002, 50000), (20002, 40000) et (5002, 10000)

3D tatoué, l'extraction de la marque reste possible. Cette robustesse est due essentiellement au mode d'extraction non-aveugle. En effet, un recalage avec la vue 2D originale permet de retrouver la position et la taille de départ.

2. Bruitage :

L'ajout involontaire ou délibéré d'un bruit dans la vue 2D de l'objet peut, lorsqu'il est suffisamment important, avoir pour effet de masquer la marque. En ce qui nous concerne, la seule information utile lors de l'extraction de la marque est la donnée de contour. Tant que cette donnée n'est pas impactée

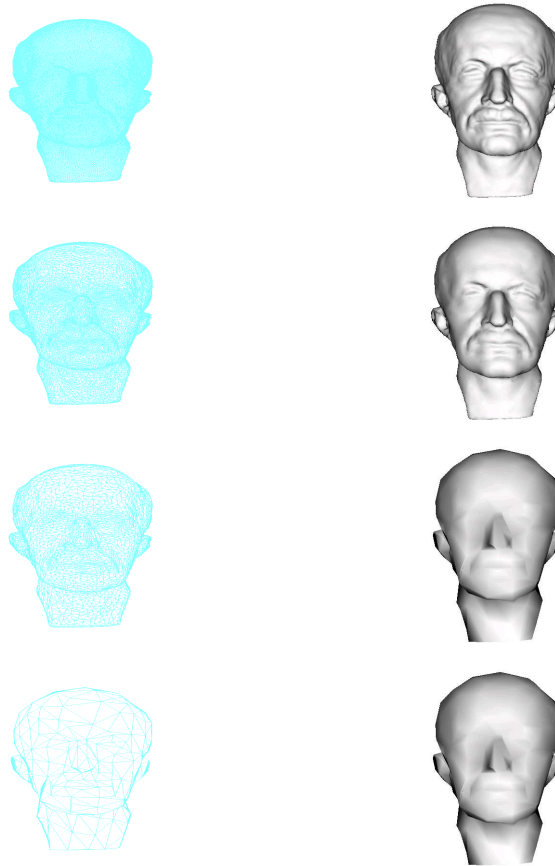


FIG. 2.11 – *Modèle de visage humain original et trois simplifications différentes (gauche) ainsi que la vue 2D correspondante (droite). La paire (nombre de sommets, nombre de triangles) est égale de haut en bas à (49132, 98260), (25002, 50000), (5002, 10000) et (252, 500).*

lors de l'ajout de bruit les résultats d'extraction restent inchangés. En revanche, on vérifie expérimentalement qu'un bruit faible sur les coordonnées du contour (bruit d'amplitude de l'ordre de $0.02 \times$ coordonnée du contour) efface la marque.

2.5 Conclusion

Le tableau Tab. 2.5 résume l'ensemble des expériences menées dans le contexte asymétrique $3D/2D$. Pour conclure sur l'ensemble des résultats de ces expériences, nous ne nous attarderons pas sur le détail des chiffres obtenus. Il suffit de constater la faisabilité de l'approche asymétrique $3D/2D$ dans certaines limites : Rendu du modèle $3D$ suivant une projection parallèle ou perspective, mais en respectant une distance limite par rapport à la caméra, extraction à partir d'une vue $2D$ peu différente de celle considérée pour l'insertion, résolution suffisante de l'image $2D$. On constate également

que la robustesse aux attaques de simplification de maillage, d'ajout de bruit ou de remaillage a été vérifiée par l'expérience.

Par ailleurs on notera que la diminution des performances due à l'extraction de la marque à partir d'une vue $2D$ légèrement différente de celle considérée pour l'insertion (2° X, 1° Y) est plus importante qu'une simplification de maillage allant jusqu'à une réduction de 30% du nombre de faces initial du modèle $3D$.

Il est important de souligner le caractère indicatif des résultats obtenus : il serait intéressant d'effectuer les mêmes expériences avec d'autres algorithmes de tatouage de lignes polygonales ou de discrétisation de silhouettes ou simplement en jouant sur certains paramètres de notre approche.

Contexte	Description	Figure/Tableau
Idéal	<p>Expérience de référence. tatouage du modèle 3D de visage suivant ses vues caractéristiques, rendu 2D selon l'une des vues caractéristiques, et extraction de la marque de cette vue 2D.</p> <p>Version simplifiée. Même expérience que l'expérience de référence mais en utilisant une version simplifiée du modèle de visage.</p> <p>Deuxième objet. Même expérience que l'expérience de référence mais en utilisant un objet 3D différent : modèle de main.</p>	<p>Fig. 2.3 Tab. 2.1 Fig. 2.4</p> <p>Fig. 2.7</p>
Conditions plus réaliste	<p>Rendu imprécis. Même expérience que l'expérience de référence mais en extrayant la marque d'une vue 2D légèrement différentes de celle considérée pour l'extraction.</p> <p>Recouvrement de marques. Même expérience que l'expérience de référence mais l'objet 3D est tatoué suivant plusieurs vues et pas seulement les vues caractéristiques.</p> <p>Projection perspective. Même expérience que l'expérience de référence mais l'objet 3D est rendu suivant une vue perspective.</p>	<p>Fig. 2.8 Tab. 2.2</p> <p>Tab. 2.3</p> <p>Tab. 2.4</p>
Attaques	<p>Diffusion de l'objet. Même expérience que l'expérience de référence mais avant diffusion de l'objet il subit des attaques :</p> <p style="padding-left: 40px;">Ajout de bruit Lissage Simplification de maillage Remaillage</p> <p>Utilisation de l'objet. Même expérience que l'expérience de référence mais après rendu de l'objet il subit des attaques :</p> <p style="padding-left: 40px;">Transformation affine Ajout de bruit</p>	<p>Tab. 2.5 Tab. 2.6 Fig. 2.10</p>

TAB. 2.7 – Récapitulatif des expériences menées pour l'évaluation de l'approche asymétrique 3D/2D de tatouage.

3

Tatouage et récupération en 3D

3.1 Introduction

La motivation principale de notre algorithme de tatouage est l'application asymétrique $3D/2D$, à savoir la protection de l'utilisation d'un modèle $3D$ dans des images ou des scènes virtuelles $2D$ (cf. chap. 1 et chap. 2).

Néanmoins, notre protocole peut être utilisé pour une application symétrique $3D/3D$, à savoir la protection de l'objet $3D$ lui-même. Il s'agit d'appliquer le même principe que pour l'approche asymétrique sauf que la marque est extraite du modèle $3D$.

Nous développons dans ce chapitre le fonctionnement général de notre approche pour une application classique $3D/3D$. Nous présentons par la suite l'ensemble des expériences menées pour évaluer les performances et les limites de cette approche dans un contexte $3D/3D$.

Une dernière partie sera consacrée à une adaptation de notre approche afin de dissimuler de l'information supplémentaire dans un modèle $3D$.

3.2 Utilisation classique $3D/3D$

La figure Fig. 3.1 illustre le schéma général de notre algorithme pour une insertion et récupération en $3D$: Étant donné un objet $3D$ représenté sous forme de maillage, on protège l'objet en tatouant ses silhouettes apparentes. Une première étape consiste à extraire les silhouettes du modèle à tatouer (*étape 1*). Une fois les silhouettes extraites et discrétisées (*étape 2*), on les tatoue avec un algorithme de tatouage de contour. L'objet tatoué peut alors être distribué. Ensuite, on peut vérifier que l'objet $3D$ est protégé en extrayant ses silhouettes (*étape 4*), les discrétiser (*étape 5*) et détecter la présence ou non de la marque (*étape 6*).

Les vues choisies pour l'extraction de silhouettes lors du processus d'insertion peuvent être générées via une clé secrète ou on peut utiliser les vues caractéristiques associées au modèle $3D$ (voir session 1.6).

Notons que notre méthode de sélection de vues caractéristiques est dynamique. Elle représente un modèle tridimensionnel avec un nombre variable de vues, en fonction de sa complexité géométrique. Cette caractéristique permet de contrôler le nombre de vues à tatouer en fonction de la complexité du modèle. En d'autres termes, elle assure un contrôle de la distortion visuelle du modèle $3D$ après marquage. Une sphère de forme régulière et simple est tatouée selon une seule silhouette, un visage humain de forme plus complexe peut être tatoué selon trois silhouettes (voir Fig. 1.9).

Il est important de préciser, que le tatouage a un impact négligeable sur le choix de vues caractéristiques. Le nombre et position des vues caractéristiques restent stables après insertion de la marque. Cette propriété a été vérifiée expérimentalement.

Pour l'extraction, la discrétisation et le tatouage de silhouettes, et pour les besoins de l'expérimentation, nous avons utilisé les mêmes techniques que celles de l'approche asymétrique (voir respectivement les sessions 1.3, 1.4 et 1.5.2).

Notre approche appliquée dans un contexte $3D/3D$ demeure non-aveugle et sans

capacité, la réponse est oui/non quant à la présence de la marque.

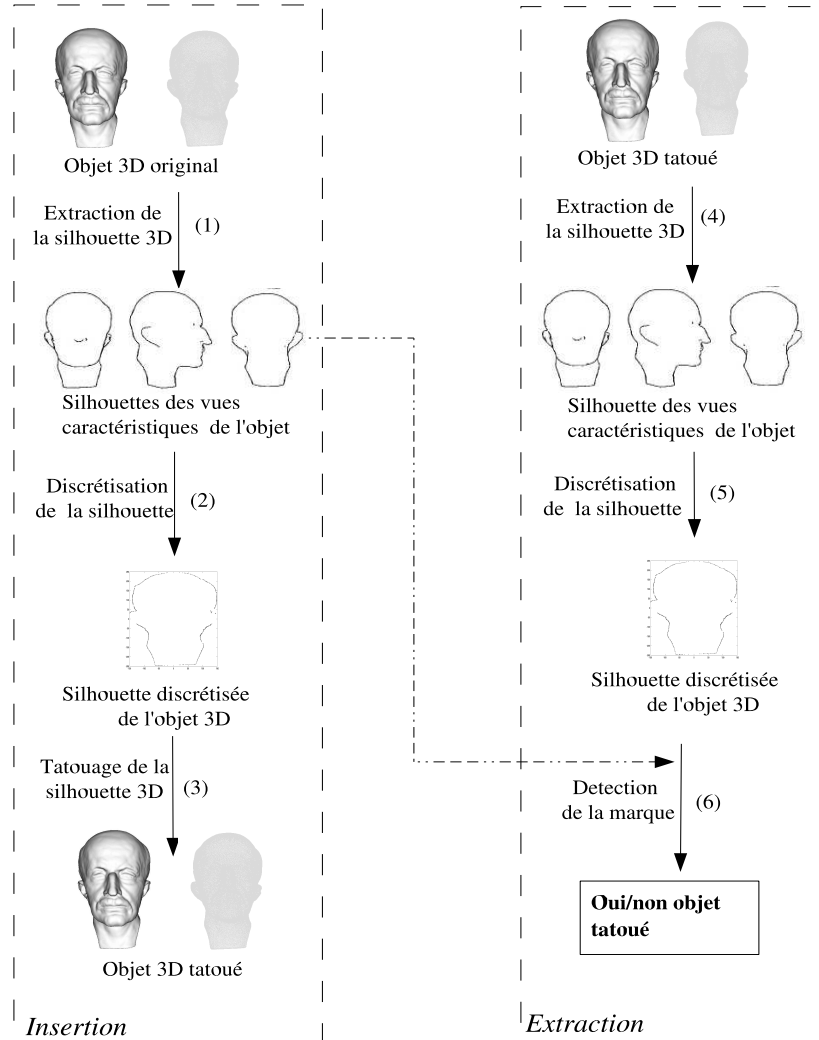


FIG. 3.1 – Schéma général de notre approche pour une insertion et récupération en 3D.

Discussion de l'étape de discrétisation de silhouette

Autant l'étape de discrétisation de silhouette est indispensable dans le cadre asymétrique 3D/2D, on peut discuter son intérêt pour un contexte symétrique 3D/3D.

On peut imaginer enfouir la marque dans la totalité des sommets de la silhouette extraite sans passer par une étape de discrétisation. Face à cette solution, on était d'emblée confronté à deux problèmes.

Un premier problème est qu'une simple réorganisation de la liste des triangles dans le fichier 3D fausse les résultats d'extraction. Cette difficulté vient du fait que la technique d'extraction de silhouette utilisée (technique force brute) fournit en sortie une liste de sommets dont l'ordre dépend de celui des arêtes du maillage.

Néanmoins, comme on travaille en mode non aveugle, on peut toujours effectuer un recalage entre l'objet 3D tatoué dont l'ordre des triangles a été modifié et sa version originale.

Le deuxième problème est que l'insertion de la marque dans tous les sommets de la silhouette peut impacter le modèle 3D après tatouage au point de créer une instabilité entre la silhouette du modèle original et tatoué. Une solution à ce problème est d'utiliser une faible force de marquage mais cela sera au détriment de la robustesse.

On représente à la figure Fig. 3.2, dans le cas de modèle de visage humain (49132s, 98260f) le pourcentage des sommets récupérés correctement en fonction de la force de marquage avec et sans discrétisation. Il est à noter que le nombre total de sommets est égal à 3383, après discrétisation il est de 106 sommets.

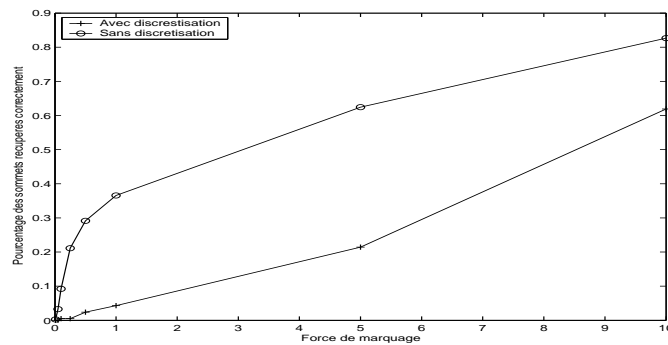


FIG. 3.2 – Pourcentage des sommets récupérés correctement en fonction de la force de marquage avec et sans discrétisation.

3.3 Évaluation de performance

Nous développons dans cette session les performances et les limites de notre procédé pour une application classique 3D/3D.

Dans toutes les expériences, on discrétise la silhouette extraite. On regroupe ainsi un ensemble de 106 sommets par silhouette pour enfouir la marque.

La première expérience que nous avons menée consiste à tatouer le modèle de visage humain (Fig. 2.1). Pour cela la même marque est insérée dans les silhouettes associées aux vues caractéristiques (voir Fig. 2.2).

L'extraction consiste à recalculer les vues caractéristiques et les silhouettes associées et d'en déduire si l'objet est tatoué ou non.

Pour nos mesures de performances, nous générons 10^4 bonnes et 10^4 mauvaises

marques. À partir de ces données, on représente les histogrammes de corrélation calculés pour les cas de présence et d'absence de marque.

La figure Fig. 3.3 illustre les résultats d'extraction à partir de l'une des trois vues caractéristiques associées au modèle de visage humain. Les distributions gaussiennes $N(0.9219, 0.0216^2)$ et $N(8.6 * 10^{-5}, 0.0679^2)$ approximent respectivement les cas de présence et d'absence de marque. Une comparaison avec la Fig. 2.3, nous fait constater une légère amélioration. Il est vraisemblable que cette légère amélioration soit due à l'absence de l'opération de rendu $2D$ (quantification des sommets tatoués $3D$ pour les rendre dans une image $2D$.)

Les résultats d'extraction à partir des deux autres vues caractéristiques sont similaires. On approxime les histogrammes de corrélation respectivement pour les cas de présence et d'absence de marque par les gaussiennes :

- Vue 2 : $N(0.9427, 0.0302^2)$ et $N(7.2 * 10^{-4}, 0.0782^2)$.
- Vue 3 : $N(0.9087, 0.0193^2)$ et $N(2.3 * 10^{-5}, 0.0614^2)$.

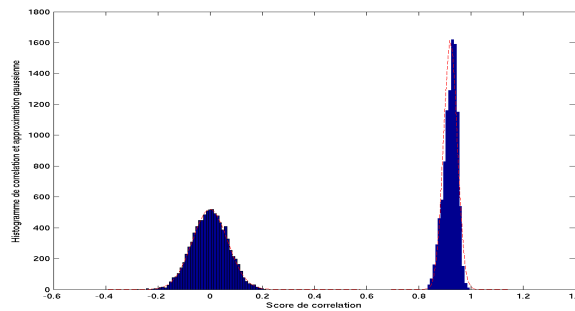


FIG. 3.3 – Résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132s, 98260f) : Histogramme de corrélation pour les cas de présence et d'absence de marque et leur approximation gaussienne $N(0.9219, 0.0216^2)$ et $N(8.6 * 10^{-5}, 0.0679^2)$.

Nous avons également effectué quelques expériences pour étudier la robustesse de ce procédé face à des manipulations divers.

3.3.1 Robustesse vis-à-vis d'une transformation affine

On constate sans surprise que le tatouage est résistant aux modifications affines de rotation et translation. Cette robustesse est due au recalage du modèle selon le repère formé par les axes principaux d'inertie avant l'extraction des vues caractéristiques.

L'objet original est supposé disponible (extraction non-aveugle) lors du processus d'extraction, un redimensionnement de l'objet à vérifier par rapport à l'objet original garantit la robustesse à un changement d'échelle uniforme.

Les résultats d'extraction obtenus face à ces manipulations (différents angles de rotation, vecteurs de translation et facteurs de zoom uniforme) présentent un EER

expérimentale inférieure à 10^{-3} .

3.3.2 Robustesse vis-à-vis d'une simplification de maillage

Une propriété désirable des algorithmes de tatouage est d'être robuste aux simplifications de maillage. Nous avons mené quelques tests pour évaluer la robustesse de notre approche face à une telle manipulation. Tous les tests ont été réalisés sur le modèle de visage humain avec (49132s, 98260f). Il en ressort qu'après une réduction allant jusqu'à 40%⁶ du nombre initial de faces, la vérification de la marque est toujours possible (voir Fig. 3.4).

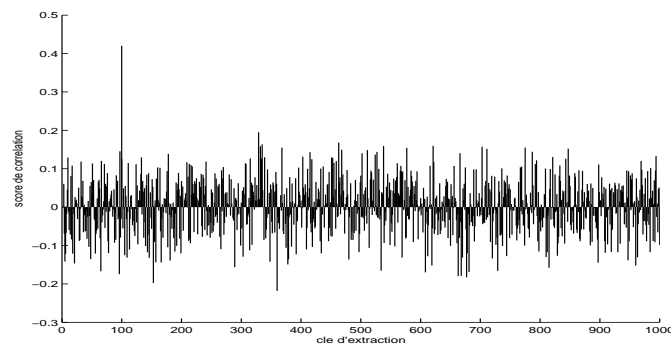


FIG. 3.4 – Résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132s, 98260f) après simplification du nombre de face de 40%. La clé #100 est celle utilisée pour l'insertion.

3.3.3 Robustesse face à l'ajout d'un bruit

Nous avons évalué les performances de notre technique en terme d'EER face à différentes amplitudes d'un bruit aléatoire ajouté aux coordonnées du maillage. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau ci-dessous (Tab. 3.1). Les performances de l'algorithme face à ce type d'attaques sont correctes, mais restent limitées par la méthode utilisée en pratique pour discrétiser la silhouette. En effet le bruit ajouté au modèle 3D peut conduire à une instabilité entre les sommets sélectionnés respectivement pour l'insertion et l'extraction.

3.3.4 Robustesse vis-à-vis d'une opération de lissage

Face à une opération de lissage avec l'opérateur Umbrella, les résultats d'extraction se dégradent au-delà de deux itérations (voir Tab. 3.2).

⁶Les opérations de simplification de maillage ont été réalisées à l'aide du logiciel QSlim

3.4. Dissimulation de données supplémentaires dans un objet 3D

objet utilisé	Amplitude du Bruit	EER expérimentale	EER analytique
Visage humain	1	$3 * 10^{-2}$	10^{-2}
	0.7	2×10^{-3}	10^{-3}
	0.5	7×10^{-4}	3×10^{-4}
	0.2	10^{-4}	2×10^{-5}

TAB. 3.1 – Impact un ajout de bruit sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f). On ajoute (Amplitude du bruit) \times (longueur de l'arête) aux coordonnées x, y, z du maillage.

objet utilisé	Nombre d'itérations	EER expérimentale	EER analytique
Visage humain	1	$2 * 10^{-4}$	$3 * 10^{-5}$
	2	$7 * 10^{-3}$	$4 * 10^{-3}$

TAB. 3.2 – Impact de l'opérateur de lissage Umbrella sur les résultats d'extraction à partir du modèle de visage humain (49132 s et 98260 f).

3.3.5 Renumérotation des sommets et triangles

Il s'agit de modifier l'ordre pour lister les triangles et sommets du maillage dans le fichier 3D. Cette opération presque anodine n'a pas d'impact sur les performances d'extraction. L'EER analytique obtenue est de l'ordre de 10^{-10} et l'EER expérimentale est égal à 0.

3.3.6 Remarques concluantes

L'application de notre approche de tatouage dans un contexte 3D/3D offre dans l'ensemble de bonnes performances en terme de robustesse face à des manipulations malveillantes ou non.

Les résultats exposés restent un aperçu limité sur les pertinences de notre algorithme. En effet, l'algorithme présente de nombreux paramètres sur lesquels on peut agir : le nombre de vues caractéristiques, les paramètres de discrétisation, la force de marquage, etc ; et il s'avère fastidieux de trouver expérimentalement les meilleurs paramètres. Nous nous sommes limités ici à présenter des résultats en gardant les mêmes paramètres, ce qui fournit une illustration plus concrète de notre approche.

3.4 Dissimulation de données supplémentaires dans un objet 3D

Le tatouage ne se limitant pas aux applications de protection des droits d'auteur et de sécurité, nous avons pensé à une adaptation de notre approche pour enfouir de l'information supplémentaire dans l'objet 3D. On peut imaginer cacher le nom de la

personne, sa date de naissance ou bien encore son genre (masculin/féminin) dans son modèle de visage 3D.

À cet effet, on utilise le même protocole que celui illustré sur la figure Fig. 3.1, sauf que la technique de tatouage de ligne polygonale est dans ce cas aveugle et avec capacité. L'idée sous-jacente de tatouer l'objet via sa silhouette demeure.

3.4.1 Codage de données dans la silhouette

Étant donné une valeur V à coder (exp. une valeur ASCII), on la quantifie sur 8 bits. La représentation binaire obtenue est notée $b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0$.

On dispose d'un ensemble de 8 sommets $S_i(x, y, z)$ avec $i = 0 : 7$ obtenus après discrétisation de la silhouette (voir session 1.4). On choisit de cacher un bit b_i dans le bit de poids faible de l'une des coordonnées x , y , ou z du sommet S_i . On propose ici d'insérer le message V dans les coordonnées x de la silhouette. Concrètement, pour cacher un bit b_i dans le coefficient x de S_i , on choisit d'abord un pas δ , qui dépend de l'intervalle où se trouve x et du niveau de distortion toléré après insertion. On calcule par la suite

$$n = \lfloor \frac{x}{\delta} \rfloor \quad (3.1)$$

Le bit de poids faible de x associé au pas de quantification δ est le bit de poids faible de n ; on le note b . Le codage de b_i dans x consiste à modifier x de sorte que son bit de poids faible à savoir b soit égal à b_i . On propose donc le système suivant pour coder la valeur de V :

$$\hat{x} = \begin{cases} (n + \frac{1}{2})\delta & \text{si } b = b_i \\ (n + \frac{1}{2})\delta + \delta & \text{si } b \neq b_i \text{ et } x \geq (n + \frac{1}{2})\delta \\ (n + \frac{1}{2})\delta - \delta & \text{si } b \neq b_i \text{ et } x < (n + \frac{1}{2})\delta \end{cases}$$

Il est à noter qu'on modifie la valeur de x même lorsque $b = b_i$ pour que son bit de poids faible reste le plus stable possible par rapport à des perturbations de faibles amplitudes. Dans le cas où $b \neq b_i$ deux cas se présentent : augmenter ou diminuer la valeur de x . On opte pour le choix qui diminue le moins la valeur de x .

Le décodage de la valeur de V consiste simplement à lire les bits de poids faibles de $\lfloor \frac{x}{\delta} \rfloor$.

Comme on dispose pour chaque sommet S_i de trois coordonnées x , y et z , on peut cacher une valeur différente dans chacune des coordonnées.

3.4.2 Répartition des données dans le modèle 3D

Étant donné un message M de taille L (en bits) à insérer, on utilise N silhouettes du modèle 3D associées à N vues différentes

$$N = k \lceil \frac{L}{24} \rceil \quad (k \geq 1) \quad (3.2)$$

Concrètement, on peut imaginer une rotation du modèle 3D avec un pas régulier α suivant son axe principal.

$$\alpha = \frac{2\pi}{N} = \frac{2\pi}{k \lceil \frac{L}{24} \rceil} \quad (3.3)$$

Comme chaque silhouette permet de coder un ensemble de 24 bits, numériquement

$$N = \lceil \frac{L}{24} \rceil \quad (3.4)$$

silhouettes suffisent pour insérer un message de taille L . On a opté pour un nombre k fois plus important de silhouettes afin de contrôler les éventuelles erreurs produites lors de l'extraction. Chaque valeur (8 bits) est enfouie dans k silhouettes successives (dans les coordonnées x , y ou z des sommets). On peut ainsi vérifier que les k valeurs lues pour une même valeur $V(b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0)$ sont égales, on peut aussi indiquer une mesure de la fiabilité du message extrait laquelle dépend du nombre k de silhouettes.

À titre d'exemple, supposons $k = 5$ et f le nombre de fois où la même valeur $V(b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0)$ est obtenue :

$$\left\{ \begin{array}{ll} f = 5 & \text{Extrême fiabilité} \\ f \in \{3, 4\} & \text{Fiabilité haute} \\ f = 2 & \text{Fiabilité modérée} \\ f = 1 & \text{Non fiable} \end{array} \right.$$

Le cas de 'non fiable' peut se produire si lors de l'extraction un ou plusieurs bits sont erronés sur un minimum de $k - 1$ silhouettes. La manière la plus simple de gérer cette erreur est de déclarer que la valeur n'est pas valide et de l'ignorer (si possible) ce qui éventuellement laissera des trous dans le message final extrait.

Une autre solution est de réaliser un vote majoritaire sur chaque bit extrait. A titre d'illustration, soit A une des valeurs du message M à enfouir. On prend $k = 5$. Après extraction on obtient les valeurs suivantes :

C	01000011
@	01000000
U	01010101
Á	11000001
a	01100001

Un vote majoritaire conduit à la représentation binaire '01000001' qui correspond à la valeur A .

3.4.3 Résultats

L'expérience que nous présentons ici, donne un aperçu général sur la pertinence de notre algorithme. Elle consiste à cacher dans le modèle de visage humain avec 10^4 faces et 5002 sommets (voir Fig. 3.5) le message 'JIHANE BENNOUR'. Nous avons choisi d'insérer chaque lettre un nombre de fois k égal à 4. Le pas de quantification δ est fixé à 0.1. L'enveloppe englobante du modèle de visage utilisé pour cette expérience est définie par :

$$\begin{aligned}x &= -151.428 \dots 151.217 \\y &= -247.456 \dots 250.049 \\z &= -214.032 \dots 170.21\end{aligned}$$

Le modèle 3D de visage est alors orienté selon le repère formé par ses axes principaux d'inertie. Vingt silhouettes sont sélectionnées pour l'insertion de la marque après échantillonnage régulier d'angle $\alpha = \frac{\pi}{10}$. Après relecture des bits de poids faibles du modèle marqué (voir Fig. 3.5)

- 5 lettres ont été extraites avec une extrême fiabilité ($f = 4$).
- 6 lettres avec une fiabilité haute ($f = 3$).
- une lettre avec une fiabilité modérée ($f = 2$)
- une dernière lettre a été reconstruite correctement par vote majoritaire.

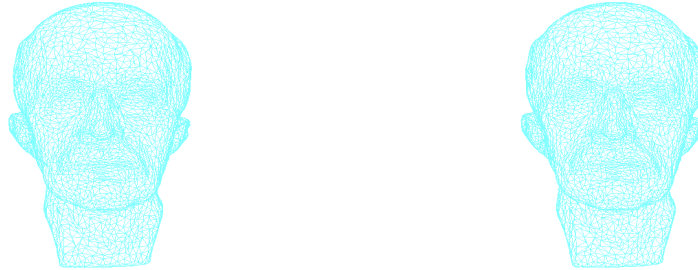


FIG. 3.5 – *Modèle original (gauche) et sa version tatouée après insertion du message 'JIHANE BENNOUR' (droite).*

Pour voir dans quelle mesure nous pouvons généraliser les résultats précédents, nous avons appliqué la même expérience à un modèle de main humaine avec 7500 faces et 3750 sommets (voir Fig. 3.6), les résultats obtenus sont similaires :

- 4 lettres ont été extraites avec une extrême fiabilité ($f = 4$).
- 6 lettres avec une fiabilité haute ($f = 3$).
- 2 lettres avec une fiabilité modérée ($f = 2$)
- une dernière lettre a été reconstruite correctement par vote majoritaire.

3.4.4 Remarques concluantes

Nous avons pris pour support la donnée de silhouette pour dissimuler de l'information dans un objet 3D. On a opté pour une insertion multiple du message pour contrôler les erreurs d'extraction. Cette application a été conçue pour résister aux manipulations de translation et rotation. Cela a été vérifié expérimentalement en relisant la marque sur un maillage tatoué ayant subi ces manipulations. Nous avons encore vérifié que d'autres opérations effacent la marque ou empêchent sa lecture : lissage avec l'opérateur Umbrella, ajout de bruit ou encore simplification de maillage. On



FIG. 3.6 – *Modèle original (gauche) et sa version tatouée après insertion du message 'JIHANE BENNOUR' (droite).*

peut avancer l'hypothèse qu'à chaque fois que la marque n'est pas relue correctement, c'est parce que plusieurs sommets de la silhouette ne sont pas reconnus comme tels, ou que la valeur qu'ils codent est faussée.

Un moyen d'accroître les performances en terme de robustesse aux attaques mais au détriment de la visibilité, est d'insérer 3 bits par silhouette (1 pour chaque coordonnées x , y et z). L'idée est de considérer la totalité des sommets de la silhouette (pas d'étape de discrétisation) et de modifier la coordonnée x (resp. y et z) de sorte que son bit de poids faible soit égal au bit à coder, à l'extraction on procédera par vote majoritaire pour décoder le bit porté par chaque groupe de coordonnées (x , y ou z) de la silhouette.

3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une adaptation de notre approche asymétrique (voir chap. 1 et chap. 2) pour un contexte de tatouage plus classique $3D/3D$ (insertion et récupération en $3D$). Cet algorithme tel qu'il a été présenté offre de bonnes performances en terme de robustesse face à des attaques de nature variées (e.g. transformations affines, simplifications de maillage, ajout de bruit, etc.).

Par ailleurs, on notera que cette technique de tatouage est sans capacité et non-aveugle, néanmoins elle peut être rendue aveugle et avec capacité via l'utilisation d'une technique de tatouage de lignes polygonales disposant de ces propriétés.

Nous avons aussi considéré la donnée de silhouette pour cacher de l'information. La méthode présentée utilise la silhouette d'un modèle $3D$ pour insérer de l'information supplémentaire liée à l'objet. La technique de tatouage (aveugle et avec capacité) que nous proposons pour coder de l'information, se base sur la modification des bits de poids faibles des coordonnées des sommets de la silhouette. Ce codage garantit une distortion visuelle minimale, en revanche il est fragile aux manipulations.

Pour résumer, toutes les approches que nous avons proposées, enfouissent de l'information au niveau de la/les silhouette(s) du modèle $3D$. Ce choix pertinent de support

d'insertion, permet en fonction des données disponibles et de l'application visée d'extraire le tatouage à partir d'une vue $2D$ de l'objet protégé dans laquelle l'information de silhouette tatouée est présente, ou à partir de l'objet protégé lui même.

4

Protocole d'évaluation des techniques de tatouage 3D

4.1 Introduction

Les méthodes de tatouage 3D sont de plus en plus nombreuses. Néanmoins il est difficile de les comparer dans la mesure où les tests de performances actuellement utilisés sont très variés. En effet aussi bien les objets 3D, que les manipulations qu'ils subissent varient d'une évaluation à l'autre.

Les résultats développés dans les diverses publications ne présentent que des tests partiels menés sur la solution. Pour avoir une comparaison 'fiable' des algorithmes il est souvent nécessaire de reprogrammer soi-même les algorithmes. Cependant, peut-on garantir une implémentation informatique aussi performante que celles des auteurs initiaux ?

Le tatouage d'images, de vidéos et de parole connaît déjà quelques protocoles pour l'évaluation de performances. On peut citer principalement :

- Le projet Européen Certimark [28], lancé en mai 2001 sous la direction de C. Rollin (Société des Auteurs et Compositeurs Dramatiques SACD), travaille principalement sur l'élaboration de tests génériques pour l'évaluation des méthodes de tatouage d'images et vidéo.
- Le projet Checkmark [29] lancé par S. Peirera, contient plusieurs attaques pour l'évaluation du tatouage d'images, et se base sur la métrique de Watson⁷ pour les mesures de visibilité. Cette dernière prend mieux en compte le critère de luminance et la visibilité d'une image que le PSNR.
- Le projet StirMark [96] initié par F. Petitcolas et al., traite le tatouage d'images et audio. Il définit pour chaque test un niveau d'assurance (Bas - modéré - haut et extrême).
- Le projet Open Watermark, lancé par B. Macq (université catholique de Louvain) propose un protocole d'évaluation des techniques de tatouage d'images.
- Optimark [87] est un outil d'évaluation des algorithmes de tatouage d'images développé par le laboratoire d'intelligence artificielle et d'analyse d'information de l'université de Thessaloniki en Grèce.
- Watermark Evaluation Testbed WET proposé par l'université de Perdu est un protocole d'évaluation des algorithmes de tatouage d'images.

Par analogie avec ces protocoles dédiés principalement aux tatouages d'images mais aussi à la vidéo et à l'audio, nous proposons dans ce chapitre un outil d'évaluation automatique des algorithmes de tatouage 3D. À notre connaissance aucun outil d'évaluation générique et standard existe actuellement au sein de la communauté de tatouage 3D. Ce protocole expérimental permettra d'une part aux chercheurs d'identifier rapidement les limites et les forces de leurs techniques et d'autre part aux industriels d'avoir une mesure de fiabilité de l'approche proposée.

⁷Cette métrique a été développée à l'origine pour évaluer la qualité des images compressées par Jpeg

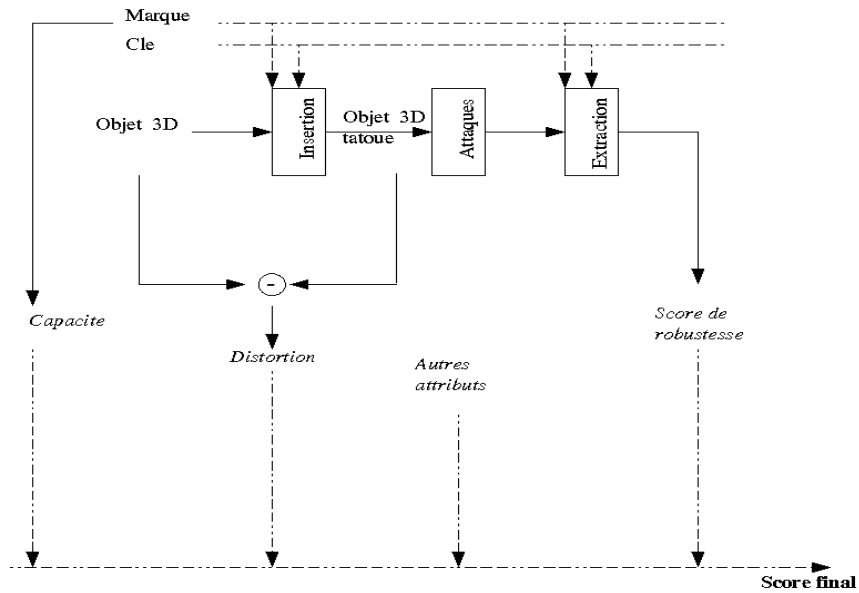


FIG. 4.1 – Schéma général du protocole d'évaluation.

4.2 Protocole d'évaluation

La performance d'un algorithme de tatouage $3D$ est toujours une question relativement complexe dans la mesure où il faut tenir compte des trois critères interdépendants de robustesse, capacité et visibilité. Une autre difficulté qui se dresse lors de la conception d'un outil d'évaluation est la diversité des techniques de tatouage, de leurs applications et des modèles $3D$ (complexité, forme géométrique, etc.). En effet, certains algorithmes sont dédiés à une application particulière ou vise une catégorie d'objets $3D$ bien spécifique. Par ailleurs, pour être facilement utilisé, et largement accepté, un système d'évaluation doit être le plus simple possible.

La figure Fig. 4.1 illustre le schéma général de notre protocole d'évaluation. On cherche à travers ce protocole à fournir un outil permettant d'évaluer les performances des algorithmes de tatouage $3D$ en terme de robustesse mais en tenant compte également des aspects capacité et visibilité.

4.2.1 Robustesse

Pour toutes les applications de tatouage d'objets $3D$ à l'exception peut-être de l'intégrité, la robustesse est un critère fondamental à prendre en compte lors de la conception d'un algorithme. Cependant, il faut reconnaître qu'une technique de tatouage ne pourra jamais être robuste à l'ensemble d'attaques d'objets $3D$.

Nous avons sélectionné pour notre protocole d'évaluation un ensemble restreint d'attaques à partir des tests réalisés dans les diverses publications. Cette sélection

est basée sur la pertinence et l'utilité de ces manipulations. En effet la marque doit pouvoir résister d'une part à des manipulations liées à son utilisation ou à la diffusion de l'objet 3D et d'autre part à des attaques malveillantes dont la motivation est de la détruire ou rendre impossible son extraction. Concrètement nous avons opté pour les attaques ci-dessous :

Transformation globale

Il est légitime pour dresser un protocole d'évaluation des techniques de tatouage de considérer en premier les attaques de transformations affines. En effet, lors de son utilisation, un objet 3D peut être sujette à des transformations affines, à savoir une translation, une rotation, un changement d'échelle ou bien encore une combinaison entre eux. Quelques techniques de tatouage reposent sur une orientation/position précise du modèle 3D pour l'extraction de la marque. Dans ce cas, une simple réorientation du modèle peut mettre en défaut l'algorithme de tatouage. Il est important de fournir aux chercheurs et/ou industriels un résultat clair et précis sur le niveau d'assurance obtenu lors de cette manipulation.

Pratiquement, pour évaluer les performances d'une technique de tatouage 3D face à ces transformations, nous utilisons le code source disponible à [100]. Les commandes associées pour :

- **Une rotation** : `infile -rot 2 1 0 0 outfile`
1 0 0 représentent les axes de rotation X , Y et Z , 2 est l'angle de rotation. La configuration 2 1 0 0 signifie que la rotation est de 2° uniquement selon l'axe X .
- **Une translation** : `infile -trans 2 2 2 outfile`
Cette commande translate le modèle 3D d'une valeur de 2 suivant chacun des trois axes X , Y et Z .
- **Un changement d'échelle** : `infile -scale 2 outfile`
Cette commande multiplie les coordonnées du modèle 3D par 2.

'infile' et 'outfile' définissent respectivement le fichier 3D original et après transformations.

Ajout de bruit

Dans la quasi totalité des tests réalisés dans les diverses publications, les auteurs indiquent la robustesse de leur approche à l'ajout d'un bruit (gaussien, aléatoire uniforme). Pour notre protocole expérimental d'évaluation, nous utilisons le code source disponible à [100] pour simuler cette attaque. La commande associée est : `infile -noisify 2 outfile`. Cette commande permet de rajouter un bruit d'amplitude 2^* (la longueur de l'arête) à chaque sommet du maillage.

Simplification de maillage

Cette manipulation permet d'accélérer la transmission du modèle 3D sur le réseau. Elle est souvent considérée comme l'attaque la plus compétitive au sein de la communauté de tatouage 3D. Pratiquement, nous utilisons pour notre protocole d'évaluation

le logiciel QSlim [76] pour cet effet. La commande associée est : `Qslim -t 2/3*(nombre de faces) infile -o outfile`. Cette opération permet de réduire de $2/3$ le nombre de faces initial du maillage.

Lissage

Il s'agit d'améliorer la qualité du maillage en gardant la topologie inchangée. Nous utilisons le code source disponible à [100] pour ce but. La commande correspondante est : `infile -usmooth 2 outfile`. 2 est le nombre d'itérations avec l'opérateur de lissage Umbrella.

Découpe

Il s'agit de récupérer seulement une partie du modèle $3D$ pour l'extraction de la marque. Le logiciel [100] est utilisé pour une manipulation de découpe et la commande associée est : `infile -clip bbox (fichier à 6 paramètres) outfile`. Uniquement la partie du modèle contenu dans la boîte englobante (définie par le fichier à 6 paramètres) est disponible pour l'extraction de la marque.

Inversement d'arêtes

C'est une sorte de remaillage. Elle consiste à inverser quelques arêtes du maillage afin de minimiser l'angle maximal pour un triangle donné. Le code source pour cette manipulation est disponible à [100] et la commande utilisée est : `infile -edgeflip outfile`.

Renumérotation des sommets

Il s'agit de modifier l'ordre des sommets dans un triangle. Cette opération presque anodine peut mettre à défaut des algorithmes de tatouage qui se basent sur une représentation maillée particulière. Le code source utilisé pour cette manipulation est disponible à [100] et la commande correspondante est : `infile -faceflip outfile`.

Plus de détails sur les différentes attaques des algorithmes de tatouage d'objets $3D$ sont fournis à la session 3.2.2 - C

4.2.2 Visibilité

Le problème est similaire à celui de l'évaluation des techniques de simplification de maillage. Le but est de quantifier la dégradation du modèle $3D$ après tatouage. Le tatouage ne doit pas modifier de manière perceptible l'apparence de l'objet $3D$.

Le manque d'une mesure qualitative et performante dans le contexte de tatouage $3D$ est flagrant (voir session 3.2.2 - A). Idéalement, la distortion devrait être mesurée par un groupe d'observateurs. Mais, est-il toujours possible et simple de mettre en place un tel système d'évaluation ?

Pratiquement nous avons opté pour la distance de Hausdorff pour nos mesures de distortion (voir session 3.2.2 - A). Le logiciel MESH [75] (Measuring Error between Surfaces using the Hausdorff distance) permet de calculer cette distance entre deux surfaces discrètes (maillage triangulaire).

4.2.3 Capacité

La capacité est la quantité d'information qu'on peut dissimuler dans un modèle 3D. Pour les techniques dites 'sans capacité', la réponse est un seul bit d'information quelque soit la taille de la marque utilisée pour l'insertion. Pour les techniques dites 'avec capacité', une des manières d'évaluer la capacité du système de tatouage est de fournir le rapport entre la taille du message extrait et le nombre de polygones du maillage (dans le cas d'un modèle 3D maillé).

Plus de détails sur la capacité d'un système de tatouage sont fournis à la session 3.2.2 - B.

4.3 Un modèle de paramétrage

Après avoir développé dans la session précédente, les différents critères (robustesse, visibilité, capacité) à prendre en considération pour une évaluation complète d'un schéma de tatouage 3D. Nous définissons ici la manière dont nous paramétrons notre système d'évaluation expérimental.

4.3.1 Objets 3D

Les performances d'un algorithme de tatouage peuvent varier d'un modèle 3D à l'autre. En effet, certains algorithmes sont dédiés à un type d'objets 3D alors que d'autres se veulent plus généraux. Un système d'évaluation fiable nécessite de définir précisément une liste variée de modèles 3D. Nous avons sélectionné les objets 3D listés dans le tableau Tab. 4.1 et disponibles pour le téléchargement à [77]. Ces modèles sont choisis pour leur diversité en termes de taille (nombre de sommets et triangles), de forme, de courbure, etc (voir Fig. 4.2).

Modèle 3D	Nombre de polygones	Nombre de sommets
Lapin	69451	35947
Budha	1087716	543652
Dragon	871414	437645
Main	654666	327323
Cheval	96966	58485

TAB. 4.1 – Modèles 3D sélectionnés pour l'évaluation.



FIG. 4.2 – Les cinq modèles sélectionnés pour l'évaluation.

4.3.2 Score de robustesse

Pour l'évaluation du score de robustesse, nous avons défini trois niveaux d'assurances possibles :

1. Bas : Des manipulations honnêtes de l'objet 3D ne doivent pas invalider l'extraction de la marque.
2. Modéré : Le schéma doit résister à des manipulations de puissances plus élevées. Ces manipulations peuvent être malveillantes ou non.
3. Haut : La puissance des attaques pour ce niveau d'assurance est relativement élevée. Ce niveau doit empêcher les utilisateurs malhonnêtes de retirer la marque ou d'empêcher son extraction.

Pour chaque modèle 3D du tableau Tab. 4.1, pour chaque attaque (voir tableau Tab. 4.2) et pour chaque niveau d'assurance, on calcule un résultat d'extraction binaire $RES_{extraction}$

$$RES_{extraction} = \begin{cases} 1 & \text{L'extraction est correcte} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Attaques	Bas	Modéré	Haut
Ajout de bruit	0.5	1	2
Lissage	2	10	30
Remaillage	-	-	-
Re-numérotation des sommets	-	-	-
Simplification de maillage	2/3	1/2	1/8
Rotation	0 - 2°	0 - 5°	0 - 180°
Changement d'échelle	2/3, 3/2	1/2, 2	1/5, 5
Découpe	1/8	1/3	1/2

TAB. 4.2 – Tableau des performances en terme de robustesse. Les paramètres de lissage (2, 10, 30) présentent le nombre d'itérations avec l'opérateur de lissage Umbrella. La rotation est suivant les trois axes X, Y et Z

On distingue deux cas pour le calcul de $RES_{extraction}$:

1. Pour les techniques de tatouage avec capacité, nous évaluons la robustesse en terme de taux d'erreur sur les bits après extraction. Ce test doit être répété pour 10 messages différents, car un test peut réussir par chance ou échouer par malchance. L'extraction est considérée erronée (c.-à-d. $RES_{extraction} = 0$) si au moins un bit sur le nombre total de messages est faux.
2. Pour les techniques sans capacité où la réponse est binaire oui/non quant à la présence de la marque, on utilise un ensemble de dix milles marques correctes et dix milles fausses. L'extraction est considérée correcte si l'EER expérimental est inférieure à 10^{-3} .

Le score final de robustesse $SCORE_{Robustesse}$ est un scalaire entre 0 et 20 défini par :

$$SCORE_{Robustesse} = \frac{1}{6} \sum_{Objets} \sum_{Attaques} \sum_{Niveau} RES_{extraction}. \quad (4.1)$$

Pour plus de précision sur les performances du schéma de tatouage proposé, les chercheurs et industriels peuvent fournir le tableau de résultats Tab. 4.2 dans sa totalité.

4.3.3 Score final

La mesure de distortion associée à la technique de tatouage est donnée par le logiciel MESH. Il s'agit de la distance de Hausdorff entre le maillage original et tatoué.

La capacité est fournie en terme de taille en bit du message extrait par rapport à la taille globale du modèle 3D (voir session 4.2.3).

À ces trois caractéristiques (robustesse, visibilité, capacité), peut se rajouter d'autres critères qui caractérisent une technique de tatouage 3D. Principalement, on peut citer, le mode d'extraction aveugle/non-aveugle ou le temps d'exécution. Nous avons opté pour une évaluation plus complète d'un schéma de tatouage 3D de rajouter le paramètre 'mode d'extraction' à notre score final. Ce dernier est alors défini comme suit :

$$S(\text{Distortion, Aveugle/Non-aveugle, Capacité, } SCORE_{Robustesse})$$

Pour simplifier le problème de mesure de robustesse, il est fréquent de fixer le paramètre de visibilité et de voir l'évolution de la robustesse et de la capacité. C'est ce que nous avons fait pour notre score spécifique. Nous avons imposé une limite de 0.06 pour la distortion en terme de distance de Hausdorff. Le score final est dans ce cas défini par :

$$S_{0.06}(\text{Aveugle/Non-aveugle, Capacité, } SCORE_{Robustesse})$$

4.4 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre une problématique importante mais souvent négligée à savoir l'évaluation des techniques de tatouage 3D.

Notre protocole de tatouage se concentre sur les attributs de visibilité, capacité et robustesse. Une liste des attaques les plus significatives a été présentée avec pour chacune d'entre elles, un lien sur le code source C++ téléchargeable librement qui permettra à chacun de les reproduire aisément. Pour les mesures de distortion nous avons opté pour la distance de Hausdorff, la principale raison de ce choix est que nous disposons du logiciel MESH pour ce calcul.

Notons que ce protocole est, à notre connaissance, une première tentative d'évaluation générique des techniques de tatouage 3D. Néanmoins des améliorations dans les tests de robustesse ou les mesures de visibilité sont envisageables. Enfin l'autre point à travailler encore est la présentation des tests et résultats.

Pour finir, nous espérons que ce protocole conduira à une évaluation fiable et fine des techniques de tatouage 3D.

Conclusion et perspectives

Dérivées des méthodes classiques de tatouage, les techniques de tatouage d'objets $3D$ se sont focalisées sur les problèmes de protection du modèle $3D$ lui-même. L'observation des algorithmes existants nous fait constater que les auteurs modifient la géométrie, la topologie ou bien encore l'organisation du fichier $3D$ afin d'assurer un service de sécurité. Parmi ceux-ci certains ont fait le choix d'être non-aveugle mais robustes aux attaques de transformations affines, de remaillage, etc. D'autres se veulent aveugles au détriment de la robustesse à certaines manipulations.

Malheureusement, aucun de ces algorithmes ne permet de savoir si une représentation visuelle $2D$ provient d'un objet tatoué ou non, alors qu'il peut être plus probable de mettre la main sur une image frauduleuse (sur le web par exemple) provenant d'un modèle $3D$ que sur l'objet $3D$ lui-même.

Notre travail s'est donc organisé autour de deux axes principaux : La protection de l'utilisation de l'objet $3D$ dans des images ou scènes virtuelles et la protection de l'objet $3D$ lui-même.

Protection de l'utilisation d'un objet $3D$

Le problème de protection de l'utilisation d'un objet (avec ou sans texture) est le problème original que nous nous sommes posé dans cette thèse. Nos efforts ont principalement porté sur la conception d'une chaîne de tatouage de modèles $3D$ avec l'espoir que la marque soit toujours présente dans les images $2D$ résultantes. L'idée proposée, consiste à tatouer un objet $3D$ via ses silhouettes apparentes. Ce choix est motivé par le fait qu'une fois projeté seule l'information de silhouette peut être récupérée de la vue $2D$ de l'objet.

Les contributions relatives à cette chaîne de tatouage sont les suivantes :

1. Principalement, la conception d'une chaîne de tatouage asymétrique : insertion dans le modèle $3D$ et extraction des vues $2D$.
2. Développement (adaptation) de deux techniques de tatouage de lignes polygonales : Une première technique aveugle qui opère dans le domaine de Fourier. Une deuxième technique non-aveugle qui opère dans le domaine spatiale.
3. Développement d'une approche de sélection de vues caractéristiques à partir d'un modèle $3D$.

La chaîne de tatouage asymétrique mise en place a été soumise à l'expérimentation. Plusieurs simulations réalisées pour des scénarios différents ont montré la faisabilité de notre approche dans certaines conditions : insérer la marque dans les silhouettes du modèle *3D* et vérifier que l'objet est protégé à partir d'une représentation visuelle *2D*.

On a constaté également une efficacité de notre approche face à certaines manipulations, principalement face à une simplification de maillage ou un ajout de bruit.

La limitation principale de notre chaîne de tatouage est le fait qu'elle soit non-aveugle. L'objet original est indispensable lors du processus d'extraction. Ce qui nous conduit à l'une des perspectives les plus intéressantes de ce travail : améliorer la chaîne actuelle pour qu'elle soit à extraction aveugle. Cette limitation est principalement due à l'étape de tatouage de lignes polygonales. Sans aller chercher plus loin, il est possible d'améliorer la chaîne de tatouage actuelle en développant un algorithme de tatouage de lignes polygonales plus adapté, ou plus simplement en jouant sur les paramètres de la technique aveugle proposée à la session 1.5.1, pour qu'elle ait un impact visuel négligeable sur l'apparence de l'objet tatoué.

Il pourrait également être intéressant de traiter les situations où l'objet *3D* est rendu dans une scène complexe, et d'étudier l'évolution des performances face à ce contexte.

Protection de l'objet 3D

La deuxième partie de la thèse, a été consacrée à l'application plus classique du tatouage *3D*, à savoir la protection de l'objet *3D* lui-même. Nous avons proposé la même chaîne que pour l'approche asymétrique sauf que la marque est extraite du modèle *3D*.

Les contributions relatives à ce protocole sont :

1. Introduction de la notion de silhouette comme support de tatouage d'un modèle *3D*.
2. Sélection automatique, en fonction de la complexité du modèle *3D*, du nombre de sites autorisé pour l'insertion de la marque, et ceci grâce au développement d'une approche dynamique de choix de vues caractéristiques.

Les simulations réalisées ont montré l'efficacité de cette approche face à des manipulations malveillantes ou non, principalement face à des transformations affines, à une simplification de maillage ou bien encore à un ajout de bruit. La limitation principale reste le mode d'extraction non-aveugle.

Le tatouage ne se limitant pas aux aspects de sécurité, nous avons utilisé le support de silhouette pour dissimuler de l'information. Nous avons proposé un algorithme d'insertion d'un message secondaire dans la/les silhouettes du modèle *3D* (exp. dissimuler le nom de la personne dans son modèle *3D* de visage). Cet algorithme code l'information dans les bits de poids faibles des coordonnées des sommets de la silhouette.

Enfin la dernière partie de cette thèse a été dédiée à l'évaluation des techniques de tatouage *3D*. Nous avons proposé un protocole d'évaluation qui se base sur les attributs de robustesse, capacité et visibilité. Ce protocole est à notre connaissance une première tentative pour l'évaluation automatique des approches de tatouage *3D*. Néanmoins, des améliorations sont d'ores et déjà à prévoir au niveau de l'architecture générale du protocole et la présentation des tests.

Au courant de cette thèse nous avons également pris part à cette course-poursuite entre 'tateurs' et 'crakers' par notre participation avec succès au concours d'attaques d'images BOWS (Break Our Watermarking System).

A

Attaques d'images (concours BOWS)

A.1 Introduction

L'ampleur des techniques de tatouage d'images actuellement existantes est telle que des nécessités se créent au sein de la communauté de tatouage pour la création d'attaques avancées. Le but est d'assurer une comparaison fine et précise des performances et limites des algorithmes proposés.

C'est dans ce contexte bien particulier que le concours BOWS (Break Our Watermarking System) a été conçu. Trois images tatouées et à niveaux de gris sont disponibles pour le téléchargement sur le site de BOWS [1] (voir Fig. A.1). Les participants doivent retirer la marque des trois images tout en gardant un PSNR entre l'image tatouée et attaquée supérieur à 30dB. La technique de tatouage utilisée n'est pas connue pour les 'crakers'.

Nous résumons brièvement dans ce chapitre les principales techniques utilisées et les résultats obtenus lors de notre participation au concours BOWS.



FIG. A.1 – Les trois images à attaquer au concours BOWS.

A.2 Techniques développées

On décrit les principales techniques utilisées pour retirer la marque tout en gardant un PSNR supérieur à 30dB. La première méthode utilisée exploite le principe de self similarité dans l'image. Cette technique permet pour la première image de retirer la marque avec un PSNR supérieur à 30dB. Pour les deux autres images, la marque est retirée mais le PSNR minimal de 30dB n'est pas assuré. Quelques techniques basiques de traitement d'images ont été utilisées pour améliorer le PSNR.

A.2.1 Technique de self similarité

Nous résumons dans cette session les principales étapes de la technique de self similarité. Plus de détails sont disponibles à [90].

L'attaque de self similarité consiste à substituer des parties de l'image par leurs similaires de l'image elle même. Le schéma général est présenté à la Fig. A.2. L'objectif est de mélanger le signal de tatouage tout en gardant le sens et le contenu de l'image inchangés.

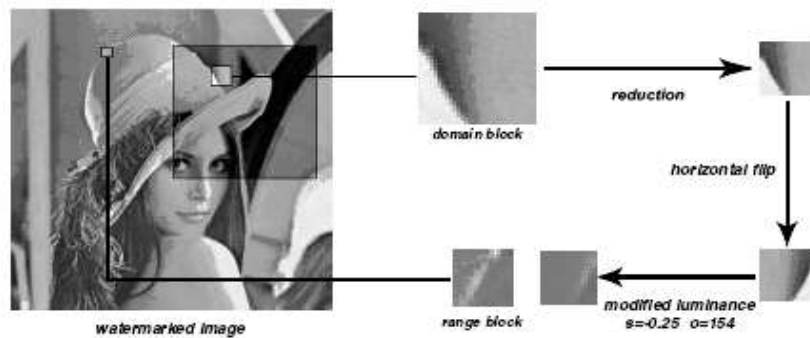


FIG. A.2 – Technique d'attaque par self similarité (figure prise de [90]).

Dans sa version de base, l'image originale est scannée bloc par bloc. Ces blocs sont labélisés blocs de substitution (bloc R_i) et sont de dimension $n * n$. Chaque bloc R_i est associé à son similaire D_i en terme d'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square).

Le bloc D_i est labélisé bloc domaine et est recherché dans un dictionnaire avec Q blocs Q_j . Ces blocs peuvent être de la même image ou d'une autre image non-tatouée de la base de données. En pratique, pour un bloc R_i , une fenêtre est sélectionnée aléatoirement dans l'image. Les blocs de cette fenêtre forment le dictionnaire. Chaque bloc Q_j est mis à l'échelle afin de correspondre au bloc de substitution R_i . Un ensemble de transformations géométriques T_k est appliqué au bloc Q_j pour avoir le bloc transformé $T_k(Q_j)$. Pour chaque bloc transformé $T_k(Q_j)$, deux paramètres s et o sont calculés

afin de minimiser l'erreur quadratique moyenne entre le bloc transformé $g = T_k(Q_j)$ et le bloc $f = R_i$.

Éventuellement le bloc transformé $s * T_k(Q_j) + o$ présente la distance RMS la plus faible avec le bloc R_i et le bloc transformé Q_j va être le bloc domaine D_i associé au bloc R_i . Comme les deux blocs R_i et D_i sont similaires, on peut substituer le bloc R_i avec la version transformée de D_i . Pour résultat, l'image sera légèrement modifiée mais la marque sera distribuée aléatoirement sur l'ensemble de l'image et le détecteur sera incapable de la récupérer.

En [37] [38] des versions améliorées de la technique de self similarité ont été présentées. L'idée de base derrière ces améliorations est qu'une combinaison de blocs est calculée comme bloc de remplacement au lieu d'un seul bloc. À titre d'exemple, on peut calculer une PCA (Principal Component Analysis) sur les blocs pour construire le bloc de remplacement.

A.2.2 Techniques basiques de traitement d'images

On décrit dans cette session les quelques techniques basiques de traitement d'images que nous avons utilisées afin d'améliorer le PSNR des images attaquées.

- Supposons que nous avons une estimation de la marque mais on ne connaît pas exactement avec quelle force on doit l'extraire, on peut utiliser la procédure ci-dessous afin d'améliorer le PSNR. On note par I_o l'image tatouée originale et I_x l'image avec la marque extraite.

1. On calcule une estimation de la marque W_x en soustrayant I_o de I_x

$$W_x = I_o - I_x. \quad (\text{A.1})$$

2. On calcule

$$I'_x = I_o - \alpha * W_x \quad (\text{A.2})$$

On modifie manuellement la valeur de α jusqu'à avoir I'_x sans marque avec une valeur de PSNR la plus élevée possible.

Si $\alpha > 1$ l'attaque sera plus importante mais le PSNR diminue.

Si $\alpha < 1$ l'attaque sera moins importante (la marque peut réapparaître) mais le PSNR augmentera (l'image est de meilleure qualité).

- Une autre solution est de moyenner plusieurs images attaquées correctement. Évidemment, on peut obtenir des meilleurs résultats en terme de PSNR si les techniques d'attaques utilisées sont différentes.
- Une autre manière d'améliorer le PSNR est de conserver la moyenne des niveaux de gris calculée par bloc.

A.3 Résultats

Nous avons attaqué les trois images avec les techniques décrites ci-dessus. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau Tab. A.1.

Notre classement final au concours BOWS est parmi les cinq finalistes.

Moyenne	Image 1	Image 2	Image 3
33.65dB	35.92dB	32.84dB	32.85dB

TAB. A.1 – *Résultats obtenus au concours BOWS.*

A.4 Conclusion

Dans ce court résumé, nous avons décrit les techniques utilisées pour l'attaque d'images tatouées dans le contexte particulier de BOWS. Nous avons utilisé une technique efficace d'attaque basée sur la self similarité de l'image et nous avons amélioré les résultats par moyen de techniques de base de traitement d'images. Nous terminons le concours à la cinquième position du classement.

D'un point de vue industriel, on peut discuter les moyens de motiver les auteurs à proposer leurs techniques pour l'évaluation. En effet, les auteurs sont souvent réticents à divulguer leurs méthodes. Ce comportement peut-être justifié par la crainte d'un acharnement qui conduirait à faire apparaître leurs faiblesses.

B

Publications de l'auteur

Etat de l'art en tatouage 3D

- Chapitre de livre en tatouage 3D (44 pages).
J. Bennour, E. Garcia, J-L. Dugelay et N. Nikolaidis. Chapitre de '3D Object Processing : Indexing, Compression and Watermarking', M. Daoudi, A. Baskurt, J-L. Dugelay, Wiley editions, USA, à apparaître en 2008.

Approche asymétrique de tatouage d'objets 3D

- Watermark recovery from 2D views of a 3D object using texture or silhouette information.
J. Bennour, E. Garcia et J-L. Dugelay. Journal of Electronic Imaging, July-August 2007.
- Protection of 3D object visual representations.
J. Bennour, J-L. Dugelay. ICME 2006, IEEE International Conference on Multimedia & Expo, July 9-12, 2006, Toronto, Canada.
- Protection of 3D objects through silhouette watermarking.
J. Bennour, J-L. Dugelay. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, 14-19 May 2006, Toulouse, France.
- Watermarking of 3D objects based on 2D apparent contours.
J. Bennour, J-L. Dugelay. EI 2006, SPIE 18th annual symposium on electronic imaging, January 2006, San Jose, USA.
- Tatouage d'objets 3D et récupération 2D.
J. Bennour, J-L. Dugelay ,TAIMA 2005, Tunisie, Hammamet, Octobre 2005.

Évaluation des techniques de tatouage

- Toward a 3D watermarking benchmark.
J. Bennour et J-L. Dugelay, MMSP 2007, IEEE International workshop on multimedia signal processing, October 1-3, 2007, Chania, Greece .

Attaques d'images

- Watermarking attack : BOWS contest.
J. Bennour, J-L. Dugelay et F. Matta. Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents IX part of Electronic Imaging, 28 January-1 February 2007, San Jose, USA | SPIE proceedings.

Autres

- Tatouage d'objets 3D via la carte de profondeur cylindrique.
J. Bennour et J-L. Dugelay, CORESA 2005, journées Compression et représentation des signaux audiovisuels, 7-8 novembre 2005, Rennes, France.
- Tests comparatifs et premières évaluations en tatouage d'objets 3-D.
J. Bennour et J-L. Dugelay, Livrable du projet RNRT Semantic 3D, Juin 2005 (21 pages).
- Mise à jour de l'état de l'art en tatouage d'objets vidéo 3-D.
J. Bennour, E. Gracia et J-L. Dugelay, Livrable du projet RNRT Semantic 3D, Mars 2005 (10 pages).

Index

Bibliographie

- [1] Bows, <http://lci.det.unifi.it/bows/>.
- [2] French national rnrt semantic 3d project, <http://liris.cnrs.fr/semantic-3d/>.
- [3] S. Abbasi and F. Mokhtarian. Affine-similar shape retrieval : application to multiview 3-d object recognition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10 :131 – 134, 2001.
- [4] A. Adelsbach and A. Sadeghi. Advanced techniques for dispute resolving and authorship proofs on digital works. In *Proceedings of the SPIE vol. 5020, Security and Watermarking of Multimedia Contents V*, pages 677–688, 2003.
- [5] P.-R. Alface and B. Macq. Blind watermarking of 3d meshes using robust feature points detection. *IEEE-International-Conference-on-Image-Processing, Piscataway, NJ, USA*, 2006.
- [6] P.-R. Alface and B. Macq. Shape quality measurement for 3D watermarking schemes. In *Proc. SPIE Vol. 6072, Security and Watermarking of Multimedia Contents VIII, San Jose, California*, January 2006.
- [7] T-F. Ansary, J-P. Vandeborre, and M. Daoudi. A bayesian approach for 3d models retrieval based on characteristic views. *Proceedings of the Pattern Recognition, 17th International Conference on (ICPR'04)*, 3 :898–901, 2004.
- [8] M. Ashourian and R. Enteshary. A new masking method for spatial domain watermarking of three dimensional triangle meshes. *IEEE ISSN*, 1 :428–431, 2003.
- [9] N. Aspert, D. Santa-Cruz, and T. Ebrahimi. Mesh : Measuring error between surfaces using the Hausdorff distance. In *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, volume 1, pages 705–708, Lausanne, Switzerland, August 2002.
- [10] O. Benedens. Geometry-based watermarking of 3D models. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(1) :46–55, 1999.
- [11] O. Benedens. Two high capacity methods for embedding public watermarks into 3D polygonal models. In *ACM Multimedia and Security Workshop*, pages 95–99, Orlando, Florida, 1999.
- [12] O. Benedens. Watermarking of 3D polygon based models with robustness against mesh simplification. In *SPIE Security and Watermarking of Multimedia Content*, pages 329–340, 1999.

- [13] O. Benedens. Affine invariant watermarks for 3D polygonal and NURBS based models. In *Third Information Security Workshop*, Wollongong, Australia, December 2000.
- [14] O. Benedens and C. Busch. Towards blind detection of robust watermarks in polygonal models. *Comput. Graph. Forum*, 19(3), 2000.
- [15] O. Benedens, J. Dittmann, and F. A. P. Petitcolas. Three-dimensional watermarking design evaluation. pages 337 – 348, 2003.
- [16] F. Benichou and G. Elber. Output sensitive extraction of silhouettes from polygonal geometry. In *PG '99 : Proceedings of the 7th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, page 60, Washington, DC, USA, 1999.
- [17] J-F. Blinn. A generalization of algebraic surface drawing. *ACM Trans. Graph.*, 1(3) :235–256, 1982.
- [18] Mark R. Bolin and Gary W. Meyer. A perceptually based adaptive sampling algorithm. *Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series) :299–309, 1998.
- [19] B. Bollabás. *Modern Graph Theory*. Springer, 1998.
- [20] A. G. Bors. Blind watermarking of 3D shapes using localized constraints. *IEEE 3DPVT*, pages 242–249, Sept 2004.
- [21] A. G. Bors. Watermarking 3D shapes using local moments. In *IEEE International Conference on Image Processing*, volume 1, pages 729–732, Singapore, Oct 2004.
- [22] A-G. Bors. Watermarking mesh-based representations of 3-d objects using local moments. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(3) :687–701, 2006.
- [23] J. Buchanan and M. Sousa. The edge buffer : A data structure for easy silhouette rendering, 2000.
- [24] C. Cachin. An information-theoretic model for steganography. *Lecture Notes in Computer Science*, 1525 :306–318, 1998.
- [25] E. Catmull and J. Clark. Recursively generated b-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer-Aided Design*, 10(6) :350–355, 1978.
- [26] F. Cayre, C. Fontaine, and T. Furon. Watermarking security, part one : theory. In *IS&T/SPIE International Symposium on Electronic Imaging, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VII*, pages 746–757, 2005.
- [27] F. Cayre and B. Macq. Data hiding on 3D triangle meshes. *IEEE Transactions on Signal Processing, Special Issue on Data Hiding and Secure Delivery of Multimedia Content*, 51(4) :939–949, 2003.
- [28] Certimark. www.certimark.org/.
- [29] Checkmark. www.watermarking.unige.ch/checkmark/.
- [30] Jin-Long Chen and George C. Stockman. 3d free-form object recognition using indexing by contour features. *Computer Vision and Image Understanding*, 71 :334 – 355, 1998.

-
- [31] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno. Metro : Measuring error on simplified surfaces. *Computer Graphics Forum*, 17(2) :167–174, 1998.
- [32] M. Corsini, E.D. Gelasca, and T. Ebrahimi. A Multi-Scale Roughness Metric for 3D Watermarking Quality Assessment. In *Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services 2005, April 13-15, Montreux, Switzerland*.
- [33] M. Corsini, E.D. Gelasca, T. Ebrahimi, and M. Barni. Watermarked 3D Mesh Quality Assessment. *IEEE Transactions on Multimedia*, 9 :247–256, february 2007.
- [34] I.-J. Cox, M. Miller, and A. L. McKellips. Watermarking as communications with side information. *Proceedings of the IEEE (USA)*, 87(7) :1127–1141, 1999.
- [35] I.J. Cox, J. Kilian, T. Leighton, and T. Shamon. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(12) :1673–1687, 1997.
- [36] S. Craver, N. Memon, B.-L. Yeo, and M. M. Yeung. Resolving rightful ownerships with invisible watermarking techniques : Limitations, attacks, and implications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(4) :573–586, 1998.
- [37] G. Doërr and J.-L Dugelay. How to combat block replacement attacks? In *IH'05, 7th Information Hiding Workshop, June 6-8, 2005, Barcelona*, Jun 2005.
- [38] G. Doërr, J.-L Dugelay, and D. Kirovski. On the need for signal-coherent watermarks. *IEEE Transactions on Multimedia, Volume 8 N°5, October 2006*, 2006.
- [39] D. Doo and M. Sabin. Behavior of recursive division surfaces near extraordinary points. *Computer Aided Design*, 10 :356–360, 1978.
- [40] C. Dorai and A-K. Jain. Shape spectrum based view grouping and matching of 3d free-form objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(10) :1139–1146, 1997.
- [41] J.-L. Dugelay and S. Roche. Introduction au tatouage d’images. In *Annales des télécommunications*, volume 54 of 9–10, pages 427–437. Groupe des écoles des télécommunications, September–October 1999.
- [42] J. Egan. *Signal Detection Theory and ROC Analysis*. Academic Press, New York, 1975.
- [43] G. Farin. *Curves and surfaces for CAGD, a practical guide*. Academic press, 1993.
- [44] James A. Ferwerda, Sumanta N. Pattanaik, Peter Shirley, and Donald P. Greenberg. A model of visual masking for computer graphics. *Computer Graphics*, 31(Annual Conference Series) :143–152, 1997.
- [45] C. Fornaro and A. Sanna. Public key watermarking for authentication of CSG models. *Computer Aided Design*, 32(12) :727–735, 2000.
- [46] T. Furon. Use of watermarking techniques for copy protection. *PhD thesis, Ecole National des Telecommunications, Rennes*, 2002.

- [47] G., C-A. Duncan, M-T. Goodrich, S. Kumar, and M. Pop. Efficient perspective-accurate silhouette computation. In *Symposium on Computational Geometry*, pages 417–418, 1999.
- [48] E. Garcia and J.-L. Dugelay. Watermark recovery from 2D views of a 3D video object. In *SPIE Electronic Imaging*, Santa Clara, California, January 2003.
- [49] E. Garcia, J.-L. Dugelay, and V. Eslava. Progressive hiding of a 3D object into its texture image. In *MMSP 2004, IEEE international workshop on multimedia signal processing, Siena, Italy*, Sep 2004.
- [50] H. Gou and M. Wu. Data hiding in curves with application to fingerprinting maps. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(10) :3988– 4005, 2005.
- [51] F. Hartung, P. Eisert, and B. Girod. Digital watermarking of MPEG-4 facial animation parameters. *Computers & Graphics*, 22(3), 1998.
- [52] Aaron Hertzmann. Introduction to 3D Non-Photorealistic Rendering : Silhouettes and Outlines. In *ACM SIGGRAPH 99 Course Notes. Course on Non-Photorealistic Rendering*, chapter 7. ACM Press/ACM SIGGRAPH, New York, 1999.
- [53] H. Hoppe. Progressive meshes. In *ACM SIGGRAPH*, pages 99–108, 1996.
- [54] S. Ichikawa, H. Chiyama, and K. Akabane. Redundancy in 3D polygon models and its application to digital signature. *Journal of WSCG*, 10(1) :225–232, 2002.
- [55] T. Isenberg, B. Freudenberg, N. Halper, S. Schlechtweg, and T. Strothotte. A Developer’s Guide to Silhouette Algorithms for Polygonal Models. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23(4) :28–37, July/August 2003.
- [56] J.-Q Jin, M.-Y Dai, H.-J Bao, and Q.-S Peng. Watermarking on 3D mesh based on spherical wavelet transform. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, pages 251–258, 2004.
- [57] W. Jinhai, B.B. Zhu, L. Shipeng, and L. Fuzong. Efficient oracle attacks on yeung-mintzer and variant authentication schemes. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 2 :931– 934, 2004.
- [58] G. Gesquière K. Hayat, W. Puech and M. Chaumont. Wavelet based data-hiding of dem in the context of real time 3d visualization. *Proc. of SPIE, Electronic Imaging, Visualization and Data Analysis, San Jose, CA, USA*, 6495(20), 2007.
- [59] Andreas Kalivas, Anastasios Tefas, and Ioannis Pitas. Watermarking of 3D models using principal component analysis. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pages 637 – 640, July 2003.
- [60] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami. Digital watermarking for 3D polygons using multiresolution wavelet decomposition. In *6th IFIP 5.2 International Workshop on Geometric Modeling : Fundamentals and Applications (GEO-6)*, pages 296–307, Tokyo, Japan, December 1998.
- [61] Z. Karni and C. Gotsman. Spectral compression of mesh geometry. In *SIGGRAPH ’00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 279–286, New York, NY, USA, 2000.

-
- [62] S. Katzenbeisser and F. A. P. Petitcolas. *Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking*. Artech House, 2000.
- [63] L. Kobbelt. Interpolatory subdivision on open quadrilateral nets with arbitrary topology. *Computer Graphics Forum*, 15(3) :409–420, 1996.
- [64] B. Koh and T. Chen. Progressive browsing of 3D models. In *IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing*, Copenhagen, Denmark, September 1999.
- [65] K.R. Kwon, S.G. Kwon, S.H. Lee, T.S. Kim, and K.I. Lee. Watermarking for 3d polygonal meshes using normal vector distributions of each patch. In *IEEE International Conference on Image Processing*, pages II : 499–502, 2003.
- [66] J. J. Lee, N. I. Cho, and J. W. Kim. Watermarking for 3D NURBS graphic data. In *IEEE International Workshop on MultiMedia Signal Processing*, December 2002.
- [67] P. Lindstrom and G. Turk. Image-driven simplification. *ACM Trans. Graph.*, 19(3) :204–241, 2000.
- [68] J.-P. Linnartz and M. Van Dijk. Analysis of the sensitivity attack against electronic watermarks in images. *Lecture Notes in Computer Science*, 1525 :258–272, 1998.
- [69] C. Loop. Smooth subdivision surfaces based on triangles. Master’s thesis, Utah University, 1987.
- [70] M. Lounsbery, T-D. DeRose, and J. Warren. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type. *ACM Trans. Graph.*, 16(1) :34–73, 1997.
- [71] M. Maes, T. Kalker, J. Linnartz, J. Talstra, G. Depovere, and J. Haitsma. Digital watermarking for dvd video copy protection. *IEEE Signal Processing Magazine*, 17(5) :47–57, 2000.
- [72] S. Mahmoudi and M. Daoudi. 3d models retrieval by using characteristic views. *IEEE international conference on Pattern Recognition, Quebec Canada*, pages 457–460, 2002.
- [73] 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 Vol. 4314, p. 253-260, Security and Watermarking of Multimedia Contents III, Ping Wah Wong ; Edward J. Delp ; Eds.*, pages 253–260, August 2001.
- [74] L. Markosian, M-A. Kowalski, S-J. Trychin, L-D. Bourdev, D. Goldstein, and J-F. Hughes. Real-time nonphotorealistic rendering. In *Proceedings of SIGGRAPH 97*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 415–420, August 1997.
- [75] MESH. www.mesh.berlios.de/.
- [76] Qslim mesh simplification software. <http://graphics.cs.uiuc.edu/garland/software/qslim.html>.
- [77] 3D models. www.mathinfo.univ-reims.fr/image/pagebuilder.php?dir=initiation&show=dataply&menu=base.

- [78] F. Mokhtarian and S. Abbasi. Automatic view selection in multi-view object recognition. In *ICPR '00 : Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, page 1013, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [79] S. Murakami and H. Ichihara. On a 3d display. method by metaball technique. *Trans. of IEICE*, J70-D(8) :1607–1615, 1987.
- [80] X. Niu, C-Y. Shao, and X-T. Wang. A survey of digital vector map watermarking. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2(6) :1301–1315, 2006.
- [81] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono. Watermarking three-dimensional polygonal models. In *ACM Multimedia*, pages 261–272, Seattle, Washington, November 1997.
- [82] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono. Geometrical and non-geometrical targets for data embedding in three-dimensional polygonal models. *Computer Communications*, August 1998.
- [83] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono. Watermarking multiple object types in three-dimensional models. In *Multimedia and Security Workshop at ACM Multimedia*, Bristol, U.K., September 1998.
- [84] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono. A shape-preserving data embedding algorithm for NURBS curves and surfaces. In *Computer Graphics International*, pages 170–177, June 1999.
- [85] R. Ohbuchi, A. Mukaiyama, and J. Takahashi. Watermarking a 3D shape model defined as a point set. *International Conference on cyberworlds*, nov 2004.
- [86] R. Ohbuchi, A. Mukaiyama, and S. Takahashi. A frequency-domain approach to watermarking 3D shapes. In *Eurographics 2002*, Saarbrucken, Germany, September 2002.
- [87] Optimark. www.poseidon.csd.auth.gr/optimark/.
- [88] J. Peters and U. Reif. The simplest subdivision scheme for smoothing polyhedra. *ACM Transactions on Graphics*, 16(4) :420–431, 1997.
- [89] E. Praun, H. Hoppe, and A. Finkelstein. Robust mesh watermarking. In *ACM SIGGRAPH*, pages 49 – 56, Los Angeles, California, August 1999.
- [90] C. Rey, G. Doërr, J.-L. Dugelay, and G. Csurka. Toward generic image dewatermarking? In *IEEE International Conference on Image Processing*, Rochester, NY, September 2002.
- [91] B. E. Rogowitz and H. E. Rushmeier. Are image quality metrics adequate to evaluate the quality of geometric objects? In *Proc. SPIE Human Vision and Electronic Imaging VI*, volume 4299, pages 340–348, June 2001.
- [92] P-V. Sander, X. Gu, S-J. Gortler, H. Hoppe, and J. Snyder. Silhouette clipping. In Kurt Akeley, editor, *Siggraph 2000, Computer Graphics Proceedings*, pages 327–334. ACM Press / ACM SIGGRAPH / Addison Wesley Longman, 2000.
- [93] Vassilios Solachidis and Ioannis Pitas. Watermarking polygonal lines using fourier descriptors. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(3) :44–51, 2004.

-
- [94] H. S. Song and N. I. Cho. digital watermarking of 3D geometry. In *Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pages 272–277, November 2004.
- [95] H. S. Song, N. I. Cho, and J. W. Kim. Robust watermarking of 3D mesh models. In *IEEE International Workshop on MultiMedia Signal Processing*, December 2002.
- [96] Stirmark. www.watermarkingworld.org/.
- [97] K. Tanaka, Y. Nakamura, and K. Matsui. Embedding secret information into a dithered multi-level image. *IEEE Military Communications Conference, 1990. MILCOM '90*, 1 :216–220, 1990.
- [98] G. Taubin. Curve and surface smoothing without shrinkage. In *ICCV '95 : Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision*, page 852, Washington, DC, USA, 1995. IEEE Computer Society.
- [99] G. Taubin, T. Zhang, and G. Golub. Optimal surface smoothing as filter design. Technical Report RC-2040, IBM, March 1996.
- [100] trimesh. www.graphics.stanford.edu/software/trimesh/.
- [101] F. Uccheddu, M. Corsini, and M. Barni. Wavelet based blind watermarking of 3D models. *multimedia and security workshop on Multimedia and security*, pages 143–154, 2004.
- [102] S. Valette, Y.S. Kim, H.Y. Jung, I.E. Magnin, and R. Prost. A multiresolution wavelet scheme for irregularly subdivided 3d triangular mesh. pages I :171–174, 1999.
- [103] M. G. Wagner. Robust watermarking of polygonal meshes. In *Geometric Modeling and Processing*, Hong Kong, China, April 2000.
- [104] C. L. Wang and M. M-F Yuen. Freeform extrusion by sketched input. *Computers & Graphics*, 27(2) :255–263, 2003.
- [105] J. Warren and H. Weimer. *Subdivision methods for geometric design, a constructive approach*. Morgan Kaufmann, 2002.
- [106] P.W. Wong and N. Memon. Secret and public key image watermarking schemes for image authentication and ownership verification. *IEEE Transaction on Image Processing*, 10(10) :1593–1601, 2001.
- [107] J. Wu and L. Kobbelt. Efficient spectral watermarking of large meshes with orthogonal basis functions. *The Visual Computer*, 21(8-10) :848–857, 2005.
- [108] L. Xie and G.R. Arce. A class of authentication digital watermarks for secure multimedia communication. In *IEEE Transaction on Image Processing*,, number 11, pages 1754–1764, 2001.
- [109] B.-L. Yeo and M. M. Yeung. Watermarking 3D objects for verification. *IEEE Computer Graphics and Applications*, pages 36–45, January/February 1999.
- [110] M. Yeung and B.-L. Yeo. Fragile watermarking of three-dimensional objects. In *IEEE International Conference on Image Processing*, volume 2, pages 442–446, 1998.

- [111] M.M. Yeung and F. Mintzer. An invisible watermarking technique for image verification. In *IEEE International Conference on Image Processing*, volume 2, pages 680–693, 1997.
- [112] K. Yin, Z. Pan, J. Shi, and D. Zhang. Robust mesh watermarking based on multiresolution processing. *Computers & Graphics*, 25 :409–420, 2001.
- [113] Z. Yu, H.H.S. Ip, and L.F. Kwok. A robust watermarking scheme for 3D triangular mesh models. *Pattern Recognition*, 36(11) :2603–2614, November 2003.
- [114] S. Zafeiriou, A. Tefas, and I. Pitas. Blind robust watermarking schemes for copyright protection of 3d mesh objects. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(5) :596–607, 2005.
- [115] D. Zorin, P. Schroder, and W. Sweldens. Interpolating subdivision for meshes with arbitrary topology. In *ACM Siggraph*, pages 189–192, 1996.

Résumé

Les algorithmes de tatouage d'objets $3D$ développés à ce jour permettent de protéger un modèle $3D$ dans la mesure où on a accès aux données $3D$ suspectes lors du processus d'extraction. Partant de l'observation qu'il est plus facile de mettre main sur une image frauduleuse générée à partir d'un objet $3D$ que sur les données $3D$ suspectes elles-mêmes, nous proposons une approche radicalement différente dont le but est de protéger l'utilisation des objets $3D$ dans des images ou scènes virtuelles. L'idée est de tatouer un objet $3D$ via sa silhouette apparente et de récupérer la marque des représentations visuelles $2D$. Plusieurs tests ont été réalisés dans des environnements variés pour étudier les performances et les limites de cette approche asymétrique $3D/2D$.

La deuxième partie de la thèse présente une application plus classique du tatouage $3D$, à savoir la protection de l'objet $3D$ lui-même. L'originalité de cet algorithme par rapport aux autres algorithmes de tatouage $3D$ est l'utilisation de la silhouette pour support de tatouage et l'introduction de la notion de vues caractéristiques.

Nous avons aussi pris pour support la silhouette pour enfouir de l'information supplémentaire dans un modèle $3D$. A cet effet, un algorithme de tatouage de ligne polygonale aveugle et avec capacité a été proposé.

La dernière partie de la thèse nous l'avons consacrée au développement d'un protocole d'évaluation des techniques de tatouage $3D$, une problématique importante mais relativement négligée par la communauté de tatouage.

Abstract

In all the published *3D* watermarking techniques, users are assumed to access the *3D* watermarking datafile to extract/detect the mark. Observing that in many cases the *3D* datafile is not accessible at the extraction step, we propose a completely different approach. It consists in watermarking *3D* objects and retrieving the mark from *2D* images or videos having used the *3D* synthetic object, thus protecting the visual representation of the object. Several tools are proposed for various environments showing the performance and limits of our asymmetric approach.

The second part of the thesis presents a more classic applications of *3D* watermarking for which both insertion and extraction are performed on the *3D* object itself. The originality of this *3D* watermarking algorithm is the use of the silhouette to embed the mark and introduction of characteristic views notion.

We have also used the silhouette to embed additional information related to the *3D* model. For this aim, we have proposed a blind watermarking technique for polygonal line which is with capacity.

The last part of this thesis is dedicated to the evaluation of *3D* watermarking techniques, an important and often neglected issue.