

N° d'ordre : 3273

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Structure de Recherche : Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Informatique et Télécommunications

Présentée et soutenue le 21/12/2019 par :

Mohamed HAMIDI

**Tatouage Robuste et Aveugle d'Images 2D et de Maillages 3D:
Application à la Protection des Droits d'Auteur**

JURY

| | | |
|-------------------------------|---|--------------------|
| Mohamed OUADOU | PES, FSR-Université Mohammed V de Rabat, Maroc | Président |
| Mohamed EL HAZITI | PH, EST-Université Mohammed V de Rabat, Maroc | Directeur de thèse |
| Said OUATIK EL ALAOUI | PES, ENSA-Université Ibn Tofail de Kénitra, Maroc | Rapporteur |
| Khadija RHOULAMI | PH, FLSH-Université Mohammed V de Rabat, Maroc | Rapporteur |
| Ahmed Driss EL MALIANI | PH, FSR- Université Mohammed V de Rabat, Maroc | Rapporteur |
| Hocine CHERIFI | PES, Université de Bourgogne, Dijon, France | Examineur |
| Mohammed EL HASSOUNI | PES, FLSH-Université Mohammed V de Rabat, Maroc | Examineur |
| Aladine CHETOUANI | PA, École d'ingénieurs Polytech Orléans, France | Invité |

Année Universitaire : 2019-2020



AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été effectués au Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications (**LRIT-CNRST 29**), à la Faculté des Sciences de Rabat, sous la direction du Professeur Mohamed EL HAZITI.

Je commence par rendre hommage à feu Professeur **Driss ABOUTAJDINE**. Je tiens à le remercier vivement pour tout ce qu'il a fait pour la recherche scientifique au Maroc ainsi que pour l'engagement qu'il avait pour tous les membres du laboratoire LRIT, moi y compris.

Je voudrais exprimer ma plus vive gratitude à mon encadrant et directeur de thèse **M. Mohamed EL HAZITI**, Professeur habilité à l'École Supérieure de Technologie de Salé. Je le remercie infiniment pour ses conseils précieux et son aide durant la préparation de cette thèse. Sans lui ce travail n'aurait jamais été accompli.

Je remercie infiniment **M. Mohamed OUADOU**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat et directeur du laboratoire LRIT, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse de doctorat malgré ses nombreuses occupations.

Je remercie **Mme. Khadija RHOULAMI**, Professeur habilité à la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Rabat, d'accepter de rapporter mon travail

de thèse et de faire partie du jury de ma soutenance.

Mes remerciements vont au Professeur **Said OUATIK EL ALAOUI**, Professeur de l'enseignement supérieur à l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Kénitra, d'accepter de rapporter ma thèse.

Je remercie également Professeur **Ahmed Drissi EL MALIANI**, Professeur habilité à la Faculté des Sciences de Rabat, d'accepter de rapporter ce travail et participer au jury.

J'exprime ma gratitude également à **Mr. Hocine CHERIFI**, professeur à l'Université de Bourgogne, Dijon, France. Je le remercie infiniment pour ses conseils fructueux ainsi que son aide considérable durant cette thèse. Sa collaboration avec nous était très riche et avantageuse. Je le remercie également pour avoir accepté d'examiner mon travail de thèse.

Je tiens à remercier chaleureusement **Mr. Mohammed EL HASSOUNI**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Rabat pour ses remarques constructives durant cette thèse. Je le remercie également pour avoir accepté de participer à ma soutenance de thèse en tant qu'examineur.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à **Mr. Aladine CHETOUANI**, maître de conférence à l'École d'ingénieurs Polytech Orléans, France. Je le remercie infiniment pour sa collaboration riche et ses directives pertinentes concernant mes travaux de recherche de cette thèse.

Je voudrai également exprimer ma gratitude à **Maman**. Je la remercie infiniment pour tout ce qu'elle a fait pour moi depuis mon enfance. Je lui dédie ce travail de thèse. Je tiens à rendre hommage à mon père que dieu ait son âme en sa miséricorde. Il aurait été fier de voir ce jour là arriver. Sans lui je ne saurais jamais où je suis aujourd'hui. Je lui dédie ce travail de thèse.



RÉSUMÉ

De nos jours, les contenus multimédia notamment les images 2D et les objets 3D, connaissent une utilisation accrue suite à la puissance des ordinateurs et aux réseaux à haut débit. Par conséquent, ces contenus peuvent être copiés ou modifiés facilement. Pour remédier à ce problème, le tatouage numérique est considéré comme une solution efficace. Il consiste à insérer une marque dans le contenu à protéger. Dans un premier lieu, nous proposons un schéma de tatouage d'images 2D robuste et aveugle dans le domaine hybride (DFT-DCT) en utilisant le cryptage d'Arnold pour renforcer la sécurité du tatouage, assurant à la fois l'imperceptibilité et la robustesse de la marque. Ensuite, nous proposons un tatouage de maillages 3D qui insère la marque par quantification par modulation d'index (QIM) des normes des sommets et la saillance. La méthode proposée assure une bonne imperceptibilité et une robustesse aux attaques géométriques et non-géométriques. Enfin, un tatouage robuste et aveugle de maillages 3D se basant sur la quantification QIM des normes des coefficients d'ondelettes et la saillance de maillages 3D est proposé. Les résultats expérimentaux montrent que cette dernière peut assurer un très bon compromis imperceptibilité-robustesse.

Mots-clés : *Contenus multimédia, tatouage d'images 2D, DFT, DCT, maillages 3D, QIM, saillance.*



ABSTRACT

Nowadays, multimedia contents especially images and 3D objects have been widely used due to the progress in computer performances and the high speed of network transmission. Consequently, these contents can be copied or modified easily. To overcome this issue, digital watermarking has been found as an efficient solution. It consists of embedding a watermark within the content to protect. We first propose a robust and blind image watermarking scheme in the hybrid domain (DFT-DCT) using Arnold encryption to enhance the watermark security. The proposed method can ensure both high imperceptibility and good robustness. Next, we propose a method that inserts the watermark by quantifying the vertex norms using Quantization Index Modulation (QIM) and 3D mesh saliency. The proposed technique shows high imperceptibility and provides good robustness to a wide range of geometric and non-geometric attacks. Finally, a robust and blind 3D mesh watermarking based on QIM quantization of the wavelet coefficients norms and mesh saliency is proposed. This method can ensure a good tradeoff between imperceptibility and robustness.

Keywords : *Multimedia contents, 3D mesh watermarking, quantization index modulation (QIM), wavelet, saliency.*



TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|----------|
| Avant-propos | i |
| Résumé | iii |
| Abstract | v |
| Liste des notations et abréviations | xi |
| Liste des figures | xix |
| Liste des tableaux | xxiii |
| Liste des algorithmes | xxiii |
| Introduction générale | 1 |
| 0.1 Contexte et problématique | 1 |
| 0.2 Contributions | 2 |
| 0.3 Plan du manuscrit | 4 |
| Chapitre 1 : Tatouage d'images 2D et de maillages 3D | 7 |
| 1.1 Introduction | 7 |
| 1.2 Schéma global | 7 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.3 | Contraintes de tatouage | 8 |
| 1.4 | Applications | 10 |
| 1.5 | Tatouage d'images 2D | 13 |
| 1.5.1 | Attaques sur les images 2D | 13 |
| 1.5.2 | Métriques d'évaluation des schémas de tatouage | 14 |
| 1.5.3 | Classification des schémas de tatouage d'images 2D | 16 |
| 1.5.3.1 | Domaine spatial | 16 |
| 1.5.3.2 | Domaine fréquentiel | 18 |
| 1.6 | Tatouage de maillages 3D | 27 |
| 1.6.1 | Modélisation géométrique d'objets 3D | 27 |
| 1.6.2 | Attaques sur les maillages 3D | 31 |
| 1.6.2.1 | Les attaques géométriques | 31 |
| 1.6.2.2 | Les attaques de <i>connectivité</i> | 32 |
| 1.6.2.3 | Autres attaques | 32 |
| 1.6.3 | Métriques d'évaluation de tatouage de maillages 3D | 33 |
| 1.6.3.1 | Maximum Root Mean Square Error (MRMS) | 34 |
| 1.6.3.2 | Distance de Hausdorff (HD) | 34 |
| 1.6.3.3 | Mesh Structural Distortion Measure (MSDM) | 35 |
| 1.6.3.4 | Corrélation normalisée (NC) | 35 |
| 1.6.4 | Classification des techniques de tatouage de maillages 3D | 36 |
| 1.6.4.1 | Techniques fragiles | 37 |
| 1.6.4.2 | Techniques de haute capacité | 39 |
| 1.6.4.3 | Techniques robustes | 41 |
| 1.7 | Conclusion | 54 |

| | |
|--|-----------|
| Chapitre 2 : Contribution 1 : Méthode de tatouage robuste et aveugle d’images basée sur DFT-DCT et la transformation d’Arnold | 57 |
| 2.1 Introduction | 57 |
| 2.2 Contexte et motivation | 57 |
| 2.3 Méthode proposée | 58 |
| 2.4 Résultats expérimentaux | 66 |
| 2.4.1 Évaluation de l’imperceptibilité | 68 |
| 2.4.2 Évaluation de la robustesse | 70 |
| 2.4.2.1 Ajout de bruit | 75 |
| 2.4.2.2 Compression JPEG et JPEG2000 | 76 |
| 2.4.2.3 Filtrage gaussien passe-bas | 81 |
| 2.4.2.4 Lissage gaussien | 82 |
| 2.4.2.5 Coupe | 83 |
| 2.4.2.6 Attaques combinées | 83 |
| 2.4.3 Complexité | 84 |
| 2.4.4 Comparaison avec les méthodes de l’état de l’art | 85 |
| 2.4.4.1 Imperceptibilité | 85 |
| 2.4.4.2 Robustesse | 86 |
| 2.4.4.3 Complexité | 88 |
| 2.5 Conclusion | 90 |
| | |
| Chapitre 3 : Contribution 2 : Tatouage robuste et aveugle de maillage 3D basé sur la saillance et la quantification QIM | 91 |
| 3.1 Introduction | 91 |
| 3.2 La méthode proposée | 92 |
| 3.2.1 Saillance de maillage | 93 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.2.2 | Quantification par modulation d'index (QIM) | 95 |
| 3.2.3 | Phase d'insertion | 96 |
| 3.2.4 | Phase d'extraction | 98 |
| 3.3 | Résultats expérimentaux | 99 |
| 3.3.1 | Imperceptibilité | 100 |
| 3.3.2 | Robustesse | 102 |
| 3.3.3 | Comparaison avec les méthodes alternatives | 104 |
| 3.4 | Conclusion | 106 |

| | | |
|---|--|------------|
| Chapitre 4 : Contribution 3 : Tatouage robuste et aveugle de maillages | | |
| 3D basé sur la transformation en ondelettes et la saillance pour | | |
| la protection des droits d'auteur | | 107 |
| 4.1 | Introduction | 107 |
| 4.2 | Méthode proposée | 107 |
| 4.2.1 | Transformée en ondelettes | 108 |
| 4.2.2 | Phase d'insertion | 109 |
| 4.2.3 | Phase d'extraction | 111 |
| 4.3 | Résultats expérimentaux | 112 |
| 4.3.1 | Imperceptibilité | 114 |
| 4.3.2 | Robustesse | 117 |
| 4.3.3 | Comparaison avec les méthodes alternatives | 120 |
| 4.4 | Conclusion | 128 |
| Conclusions et perspectives | | 129 |
| Liste des publications | | 133 |
| Bibliographie | | 135 |



LISTE DES NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

| | |
|-------------|---|
| DFT | <i>Discrete Fourier Transform</i> |
| DCT | <i>Discrete Cosine Transform</i> |
| DWT | <i>Discrete Wavelet Transform</i> |
| SVD | <i>Singular Value Decomposition</i> |
| JPEG | <i>Joint Photographic Experts Group</i> |
| SURF | <i>Speeded Up Robust Features</i> |
| RDWT | <i>Redondant Discrete Wavelet Transform</i> |
| NSCT | <i>Non Sub-sampled Contourlet Transform</i> |
| DCuT | <i>Discrete Curvelet Transform</i> |
| HVS | <i>Human Visual System</i> |
| DE | <i>Differential Evolution</i> |
| 3D | Three-Dimensional |
| QIM | <i>Quantization Index Modulation</i> |
| SCS | <i>Scalar Costa Scheme</i> |
| MSE | <i>Mean Square Error</i> |
| LSB | <i>Least Significant Bit</i> |
| PSNR | <i>Peak Signal to Noise Ratio</i> |

| | |
|-------------|---|
| SSIM | <i>Structural Similarity Index</i> |
| BER | <i>Bit Error Rate</i> |
| CPU | <i>Central Processing Unit</i> |
| RMS | Root Mean Square Error |
| MRMS | <i>Maximum Root Mean Square Error</i> |
| HD | <i>Hausdorff Distance.</i> |
| MSDM | <i>Mesh Structural Distortion Measure</i> |
| CSG | <i>Constructive Solid Geometry</i> |
| EGI | <i>Extended Gaussian Image</i> |
| NC | <i>Normalized Correlation</i> |
| CR | <i>Compression Ratio</i> |
| IRM | <i>Imagerie par Résonance Magnétique</i> |



LISTE DES FIGURES

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Schéma général d'un système de tatouage numérique. | 8 |
| 1.2 | La femme dans l'image à gauche a été supprimé de la scène, le résultat est dans l'image à droite. Cette opération ne nécessite que 10 minutes en utilisant l'outil Adobe Photoshop (Cox <i>et al.</i> , 2007). | 12 |
| 1.3 | Deux niveaux de décomposition en ondelettes d'une image. | 23 |
| 1.4 | Exemple de nuage de points de l'objet main. | 28 |
| 1.5 | Exemple de représentation en surfel de l'objet visage. | 28 |
| 1.6 | Exemple de représentation en voxels. | 29 |
| 1.7 | Exemple de représentation en octree. | 30 |
| 1.8 | Exemple de représentation en maillage triangulaire de l'objet Dragon. | 31 |
| 1.9 | Exemple d'attaques appliquées sur l'objet Rabbit : (a) maillage original, (b) après ajout de Bruit, (c) après lissage , (d) après quantification , (e) après transformation de similarité, (f) après coupe. | 33 |
| 1.10 | La primitive de tatouage de la méthode de Cayre et Macq (2003), la projection du sommet initial v est déplacée vers le sommet tatoué v' dans l'intervalle le plus proche contenant le bit '0' à insérer : (a) l'arête opposée est divisée en deux intervalles, (b) l'arête opposée est divisée en quatre intervalles. | 41 |

| | | |
|------|---|----|
| 1.11 | Processus d'insertion de tatouage en modifiant la moyenne dans la méthode de Cho <i>et al.</i> (2006) : (a) la distribution uniforme supposée dans un bin ; (b) la valeur moyenne est augmentée pour insérer le bit '+1' ; (c) la valeur moyenne est diminuée pour insérer le bit '-1'. | 44 |
| 1.12 | Processus d'insertion de Cayre <i>et al.</i> (2003). | 50 |
| 1.14 | Décomposition en ondelettes du maillage semi-régulier Bunny : (a) Maillage dense , (b) après une seule décomposition, (c) après deux décompositions, (d) représentation grossière du maillage Bunny. | 52 |
| 1.13 | Illustration du processus de décomposition en ondelettes pour les maillages semi-réguliers. | 52 |
| 2.1 | (a) Marque originale, (b) Marque cryptée. | 60 |
| 2.2 | Schéma d'insertion de tatouage de la méthode proposée. | 62 |
| 2.3 | (a) Module DFT original (b) Module DFT modifié de l'image Mandrill avec ($k = 9600$). | 63 |
| 2.4 | Schéma d'extraction de tatouage de la méthode proposée. | 66 |
| 2.5 | Les valeurs de corrélation lors de la variation des puissances de tatouage après avoir appliqué quelques attaques sur Lena. | 67 |
| 2.6 | Les valeurs de PSNR obtenues en fonction des puissances de tatouage après avoir appliqué quelques attaques sur Lena. | 68 |
| 2.7 | Différence absolue entre l'image originale et l'image tatouée : (a) Mandrill, (b) D94. | 69 |
| 2.8 | (a) : Histogramme illustrant l'imperceptibilité de l'image Lena, (b) : Histogramme illustrant l'imperceptibilité de l'image D19 prise de Brodatz. | 70 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.9 | Images originales : (a) Mandril, (b) Peppers, (c) Cameraman, (d) Lena, (e) Goldhill, (f) Walkbridge, (g) Womanblonde, (h) Livingroom, (i) Pirate, (j) Lake, (k) Mandril tatouée. Images tatouées correspondantes : (l-t). | 74 |
| 2.10 | Échantillon d'images texturées originales : (a) D9, (b) D94, (c) D15, (d) D24, (e) D84, (f) D19. Image texturées tatouées correspondantes : (g-l). | 75 |
| 2.11 | Série d'attaques appliquées à l'image Mandrill tatouée : (a) GN ($\mu = 0, \sigma = 0.001$), (b) SPN $\sigma = 0.01$, (c) JPEG 90%, (d) JPEG 60%, (e) LPGF 3×3 , (f) LPGF 9×9 , (g) HE, (h) GS 9×9 , (i) HE + GN $\sigma = 0.001$, (j) HE + SPN $\sigma = 0.01$, (k) GN $\sigma = 0.001$ + JPEG 90, (l) SPN $\sigma = 0.01$ + JPEG 90%, (m) Coupe 25%, (n) Coupe 50%, (o) Rotation 1° | 78 |
| 2.12 | La robustesse en termes de corrélation normalisée (NC) après avoir appliqué plusieurs attaques à une série d'images texturées. | 79 |
| 2.13 | Marques extraites après quelques attaques : (a) Marque insérée, (b) HE, (c) GN ($\sigma = 0.001$), (d) SPN, (e) LPGF (taille de fenêtre : (9×9)), (f) JPEG (Q= 60), (g) JPEG (Q= 65), (h) JPEG (Q= 70), (i) JPEG (Q= 75), (j) Lissage gaussien (taille de fenêtre : (9×9)), (k) Coupe 50%, (l) Coupe 25%, (m) HE+ SPN ($\sigma = 0.001$), (n) GN ($\sigma = 0.001$) + JPEG (QF= 90), (o) SPN ($\sigma = 0.001$) + JPEG (QF= 90), (p) HE + GN ($\sigma = 0.001$). | 80 |
| 2.14 | Robustesse en termes de corrélation NC après attaque de compression JPEG appliquée à un ensemble d'images texturées. | 80 |
| 2.15 | Robustesse en termes de corrélation NC après attaque de compression JPEG appliquée à un ensemble d'images naturelles. | 81 |

| | | |
|------|--|-----|
| 2.16 | Robustesse en termes de corrélation (NC) après attaque de compression JPEG2000 appliquée à : (a) : une série d'images naturelles ; (b) : une série d'images texturées. | 82 |
| 2.17 | Robustesse en termes de corrélation NC après l'attaque de coupe appliquée à un ensemble d'images naturelles. | 84 |
| 3.1 | La saillance de l'objet Bimba avant et après attaques : (a) avant attaque, (b) bruit additif 0.3%, (c) transformation de similarité 1, (d) Simplification 10%, (e) Quantification 9 bits, (f) Smoothing $\lambda = 0.1$ (30 iterations). | 92 |
| 3.2 | Processus de calcul de la saillance de Lee <i>et al.</i> (2005). | 94 |
| 3.3 | Saillance des maillages 3D utilisant la méthode de Lee <i>et al.</i> (2005) : (a) Flower, (b) Vase, (c) Cup, (d) Cat. | 95 |
| 3.4 | Principe de la quantification basée sur la modulation de l'index (QIM) de (Chen et Wornell, 2001). | 96 |
| 3.5 | Processus d'insertion du tatouage. | 97 |
| 3.6 | Processus d'extraction du tatouage. | 99 |
| 3.7 | Objets Originaux Vs objets tatoués : (a) Flower original, (b) Vase original, (c) Bimba original, (d) Vase original, (e) Flower tatoué, (f) Vase tatoué, (g) Bimba tatoué, (h) Cup tatoué. | 100 |
| 3.8 | Cinq versions d'attaques appliquées à Bimba : (a) ajout de bruit 0.50%, (b) lissage $\lambda = 0.1$ avec 5 itérations, (c) quantification 9 bits, (d) transformation de similarité , (e) coupe (10.0%). | 102 |
| 4.1 | Schéma de processus d'insertion de tatouage. | 109 |
| 4.2 | Schéma de processus d'extraction de tatouage. | 111 |
| 4.3 | Performance de robustesse en termes de corrélation utilisant plusieurs pas de quantification pour les modèles Bimba, Horse et Bunny. | 113 |

-
- 4.4 Performance d'imperceptibilité en termes de mesure structurelle de distorsion (MSDM) utilisant différents pas de quantification pour les modèles Bimba, Horse, et Bunny. 113
- 4.5 Performance d'imperceptibilité en termes de l'erreur quadratique maximum (MRMS) utilisant différents pas de quantification pour les modèles Bimba, Horse, et Bunny. 114
- 4.6 Maillages originaux Vs maillages tatoués : (a) Flower original; (b) Flower tatoué; (c) Vase original; (d) Vase tatoué; (e) Cat original; (f) Cat tatoué. 114
- 4.7 Gros plans des maillages originaux et tatoués : (a) Bunny original; (b) Bunny tatoué; (c) Bimba original; (d) Bimba tatoué; (e) Cat original; (f) Cat tatoué. 116
- 4.8 Bimba original et cinq attaques appliquées à l'objet Bimba : (a) Bimba original, (b) bruit additif (0.50%), (c) lissage ($\lambda = 0.1$) avec 5 itérations, (d) quantification 9 bits, (e) transformation de similarité (Rotation), (f) coupe (10.0%). 119
- 4.9 La robustesse de la méthode Cho *et al.* (2006) comparée à la méthode proposée en termes de corrélation NC pour l'objet Bunny contre différentes attaques; A : bruit 0.1%; B : bruit 0.3%; C : bruit 0.5%; D : quantification 9 bits; E : quantification 8 bits; F : quantification 7 bits; G : lissage ($\lambda = 0.3$, 10 itérations); H : lissage ($\lambda = 0.3$, 30 itérations); I : lissage ($\lambda = 0.3$, 50 itérations). 127

| | |
|---|-----|
| 4.10 La robustesse de la méthode Wang <i>et al.</i> (2008b) comparée à la méthode proposée en termes de corrélation NC pour l'objet Bunny contre différentes attaques; A : bruit 0.05%; B : bruit 0.25%; C : bruit 0.5%; D : quantification 9 bits; E : quantification 8 bits; F : quantification 7 bits; G : lissage ($\lambda = 0.1$, 10 itérations); H : lissage ($\lambda = 0.1$, 30 itérations); I : lissage (0.1, 50 itérations). | 128 |
|---|-----|



LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Tableau comparatif des techniques robustes de tatouage de maillages en termes de capacité et de type d'extraction. | 42 |
| 2.1 | Comparaison d'imperceptibilité entre l'algorithme basé sur la DFT uniquement et l'algorithme proposé basé sur la combinaison DFT-DCT pour plusieurs images de test. | 71 |
| 2.2 | Imperceptibilité du tatouage mesurée en termes de PSNR (dB) et SSIM. | 72 |
| 2.3 | Valeurs SSIM et NC après plusieurs attaques appliquées à l'image D9 extraite de la base de donnée (Brodatz, 1966). | 73 |
| 2.4 | Comparaison de la robustesse en termes de corrélation entre l'algorithme basé sur la DFT seule et l'algorithme basé sur la DFT-DCT pour l'image Mandrill. | 76 |
| 2.5 | Valeurs NC après plusieurs attaques appliquées à l'image Mandrill. | 77 |
| 2.6 | Temps CPU pour la méthode de tatouage proposée. | 85 |
| 2.7 | Comparaison d'imperceptibilité et capacité de tatouage pour l'image Lena. | 85 |

| | | |
|------|---|-----|
| 2.8 | Comparaison d'imperceptibilité en termes de PSNR et SSIM entre la méthode proposée et la méthode de Singh <i>et al.</i> (2017c) utilisant une marque de taille 256×256 | 86 |
| 2.9 | Comparaison de robustesse en termes de NC contre l'attaque de bruit sel et poivre avec la méthode de Sahraee et Ghofrani (2013). | 86 |
| 2.10 | Les valeurs de corrélation (NC) après compression JPEG avec différents facteurs de qualité. | 88 |
| 2.11 | Comparaison de la robustesse de la méthode proposée avec la méthode de Singh <i>et al.</i> (2017c) contre quelques attaques appliquées à Lena. | 88 |
| 2.12 | Comparaison de la robustesse du schéma proposé avec des méthodes alternatives contre plusieurs attaques appliquées à l'image Lena. | 89 |
| 2.13 | Comparaison de la robustesse de l'algorithme proposé avec différentes méthodes contre plusieurs attaques appliquées à Lena. | 89 |
| 3.1 | Imperceptibilité du tatouage mesurée en termes de MRMS, HD et MSDM. | 101 |
| 3.2 | Imperceptibilité du tatouage sans et avec utilisation de la saillance mesurée en termes de MRMS, HD et MSDM. | 102 |
| 3.3 | Robustesse du tatouage contre le bruit additif, lissage Laplacien et réarrangement des éléments mesurée en termes de corrélation. | 104 |
| 3.4 | Robustesse du tatouage contre la quantification, les transformations de similarité, la subdivision et la coupe mesurée en termes de corrélation. | 104 |
| 3.5 | Comparaison d'imperceptibilité avec les schémas de Cho <i>et al.</i> (2006), Rolland-Neviere <i>et al.</i> (2014) et Son <i>et al.</i> (2017) mesurée en termes de MRMS et MSDM pour le modèle Horse. | 104 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.6 | Comparaison de robustesse de la méthode proposée avec les schémas de Cho <i>et al.</i> (2006) et de Zhan <i>et al.</i> (2014) contre le bruit additif, le lissage et la quantification en termes de corrélation pour Bunny. | 105 |
| 3.7 | Comparaison de robustesse de la méthode proposée avec les schémas de Cho <i>et al.</i> (2006) et de Zhan <i>et al.</i> (2014) contre le bruit additif, le lissage et la quantification en termes de corrélation pour Venus. | 105 |
| 4.1 | Imperceptibilité de la marque mesurée en termes de MRMS, HD et MSDM. | 115 |
| 4.2 | Imperceptibilité de la marque sans et avec saillance mesurée en termes de MRMS, HD, et MSDM. | 116 |
| 4.3 | Robustesse de la marque contre l'ajout de bruit mesurée en termes de corrélation NC. | 117 |
| 4.4 | Robustesse du tatouage contre le lissage Laplacien ($\lambda = 0.1$) mesurée en termes de corrélation. | 117 |
| 4.5 | Robustesse de la marque contre le réarrangement d'éléments évaluée en termes de corrélation. | 120 |
| 4.6 | Robustesse de la marque contre la quantification. | 120 |
| 4.7 | Résultats de comparaison de robustesse de la méthode proposée avec celle de Son <i>et al.</i> (2017) en termes de taux d'erreur binaire (BER) contre l'attaque de quantification. | 120 |
| 4.8 | La robustesse de la méthode proposée contre les transformations de similarité en termes de corrélation. | 120 |
| 4.9 | Robustesse du tatouage contre l'attaque de subdivision en termes de corrélation. | 121 |
| 4.10 | Robustesse de tatouage contre l'attaque de coupe en termes de corrélation. | 121 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.11 | Comparaison d'imperceptibilité de la méthode proposée avec les schémas de Cho <i>et al.</i> (2006), Rolland-Neviere <i>et al.</i> (2014) et Son <i>et al.</i> (2017) en termes de MRMS et MSDM pour le modèle Horse. | 121 |
| 4.12 | Comparaison d'imperceptibilité avec la méthode de Wang <i>et al.</i> (2008b) en termes de MRMS et MSDM pour les modèles Horse et Venus. | 122 |
| 4.13 | Comparaison d'imperceptibilité avec les méthodes de Cho <i>et al.</i> (2006) et Medimegh <i>et al.</i> (2018) en termes de distance d'Hausdorff (HD). | 122 |
| 4.14 | Comparaison de robustesse avec les schémas de Cho <i>et al.</i> (2006) et Medimegh <i>et al.</i> (2018) en termes de corrélation NC. | 122 |
| 4.15 | Comparaison de robustesse avec la méthode de Son <i>et al.</i> (2017) en termes de BER contre le lissage. | 123 |
| 4.16 | Comparaison de qualité et de robustesse avec le schéma Wang <i>et al.</i> (2008b) contre le bruit mesurée en termes de MRMS, HD et MSDM. | 124 |
| 4.17 | Comparaison des résultats de qualité et robustesse avec la méthode de Wang <i>et al.</i> (2008b) contre la quantification en termes de MRMS, HD, MSDM, et NC. | 124 |
| 4.18 | Comparaison des résultats d'imperceptibilité et de robustesse avec le schéma de Wang <i>et al.</i> (2008b) contre le lissage Laplacien($\lambda = 0.1$) en termes de MRMS, HD, MSDM, et NC. | 125 |
| 4.19 | Résultats de comparaison de corrélation normalisée NC de la méthode proposée avec Cho <i>et al.</i> (2006) pour le modèle Bunny. | 126 |
| 4.20 | Résultats de comparaison de corrélation normalisée NC de la méthode proposée avec (Nakazawa <i>et al.</i> , 2010) pour le modèle Bunny. | 127 |



LISTE DES ALGORITHMES

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Insertion de la marque | 64 |
| 2.2 | Extraction de la marque | 65 |
| 3.1 | Insertion du tatouage. | 96 |
| 3.2 | Extraction du tatouage. | 98 |
| 4.1 | Procédure d'insertion de la marque | 110 |
| 4.2 | Procédure d'extraction de la marque | 112 |



INTRODUCTION GÉNÉRALE

0.1 Contexte et problématique

De nos jours, l'utilisation des contenus multimédias à savoir les images, les sons, les vidéos et les objets 3D est devenue très répandue grâce au développement des réseaux à haut débit ainsi qu'à l'augmentation considérable de la puissance des ordinateurs. Cette fluidité de transmission a rendu facile l'utilisation de ces contenus. Toutefois, leur duplication, modification ou redistribution par une personne non autorisée représente un problème très inquiétant. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre une technique de sécurité. Le tatouage numérique est considéré comme une solution efficace pour remédier à ce problème. Son principe est d'insérer une information supplémentaire appelée marque, "watermark" en anglais, dans le contenu à sécuriser. Cette insertion doit être à la fois imperceptible et robuste aux différentes manipulations que peut subir ce contenu. Il est à noter que dans cette thèse, nous allons nous focaliser sur les images 2D et les maillages 3D comme supports d'insertion de la marque.

0.2 Contributions

Cette thèse de doctorat traite le sujet de tatouage numérique d'images 2D et de maillages 3D.

Nous avons commencé nos travaux de recherche en proposant un schéma de tatouage aveugle et robuste exploitant le module de la DFT et les caractéristiques de la DCT pour assurer à la fois la résistance aux attaques et l'invisibilité Hamidi *et al.* (2015). Pour le tatouage de maillage 3D, on a commencé nos contributions par une méthode aveugle et robuste insérant la marque en modifiant les normes des coefficients d'ondelettes du niveau grossier en prenant la norme des normales comme primitives de synchronisation Hamidi *et al.* (2017). Ensuite, nous avons proposé une technique basée sur la saillance de maillages où la marque est insérée en quantifiant les normes des sommets en utilisant la quantification SCS (Scalar Costa Scheme) Hamidi *et al.* (2019c).

Dans cette thèse, nous présentons trois contributions majeures de tatouage pour la protection des droits d'auteur.

La première contribution décrit la méthode robuste et aveugle proposée de tatouage d'images 2D basée sur la transformée de Fourier discrète (DFT), la transformée en cosinus discrète (DCT) et la transformation d'Arnold (Hamidi *et al.*, 2018). L'approche proposée vise à protéger les droits d'auteur des images naturelles et texturées. Pour se faire, un tatouage robuste est inséré dans le domaine hybride (DFT-DCT) assurant un très bon compromis imperceptibilité-robustesse. La transformation d'Arnold a pour objectif de crypter la marque afin d'augmenter la sécurité. Plusieurs expérimentations ont été menées, en termes d'imperceptibilité et de robustesse, afin de montrer l'efficacité du schéma proposé. Par ailleurs, une comparaison avec les méthodes alternatives, a montré que notre proposition

est résistante à une variété d’attaques tout en assurant une bonne imperceptibilité.

La deuxième contribution présente la méthode de tatouage de maillage 3D robuste et aveugle proposée se basant sur la quantification (QIM) et la saillance des maillages pour la protection des droits d’auteur (Hamidi *et al.*, 2019a). La marque est insérée par quantification de normes des sommets du maillage 3D, car elle offre un bon compromis robustesse-capacité. Le choix des sommets est réalisé en se basant sur la saillance de maillage pour obtenir une meilleure robustesse et éviter les distorsions visuelles. Les résultats expérimentaux montrent la bonne imperceptibilité du schéma proposé tout en garantissant une forte robustesse contre une variété d’attaques, notamment le bruit additif, les transformations de similarité, le lissage, la quantification, etc.

Dans la troisième contribution, nous présentons notre méthode de tatouage de maillage 3D robuste et aveugle basée sur la transformation en ondelettes et la saillance pour la protection des droits d’auteur (Hamidi *et al.*, 2019b). La marque est insérée par quantification QIM des coefficients d’ondelettes ainsi que la saillance afin d’assurer une bonne imperceptibilité et une résistance à une large gamme d’attaques. L’imperceptibilité est assurée en exploitant les avantages de la saillance dans le but de définir les vecteurs d’ondelettes à quantifier. La robustesse est atteinte en utilisant le schéma de quantification QIM des vecteurs d’ondelettes sélectionnés. La primitive de synchronisation de la marque est la distance entre les sommets saillants et le centre de gravité du maillage. Les bonnes performances obtenues en termes de robustesse et d’imperceptibilité ont été validées par les différentes expérimentations réalisées et les comparaisons avec les méthodes de l’état de l’art.

0.3 Plan du manuscrit

Le manuscrit de thèse est composé de quatre chapitres, en plus de l'introduction générale et de la conclusion et perspectives.

Le premier chapitre présente un état de l'art sur le tatouage d'images 2D et de maillages 3D. Nous y détaillons son schéma global, ses contraintes, les attaques possibles, ses applications. Nous y présentons aussi une classification détaillée des méthodes de tatouage d'images 2D et de maillages 3D : suivant le domaine d'insertion (spatial ou fréquentiel), la méthode d'extraction (aveugle, semi-aveugle, non-aveugle), la robustesse (robuste, semi-fragile, fragile), etc.

Dans le deuxième chapitre nous proposons une méthode de tatouage hybride, robuste et aveugle d'images 2D basée sur la transformée en cosinus discrète (DCT) et la transformée de Fourier discrète (DFT) en utilisant la transformation d'Arnold pour crypter la marque insérée. Dans ce chapitre nous expliquons tout d'abord le principe de notre contribution et sa motivation. Après, nous éclaircissons le pré-traitement appliqué à la marque qui consiste à crypter cette dernière à l'aide de la transformation d'Arnold. Ensuite, nous décrivons les phases d'insertion et d'extraction de la marque. Finalement, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus tout en mettant la lumière sur les limitations du schéma proposé. Nous finissons par une comparaison avec les méthodes alternatives en termes de robustesse, d'imperceptibilité de capacité et de complexité.

Une technique de tatouage robuste et aveugle se basant sur la saillance de maillages 3D et la quantification par modulation de l'index (QIM) est présentée dans le troisième chapitre. Nous y expliquons le contexte et la motivation de cette contribution. Nous y détaillons l'approche proposée, en décrivant les étapes d'insertion et d'extraction du tatouage, à savoir l'utilisation de la quantification QIM

des normes des sommets du maillage 3D ainsi que la saillance. Ensuite, nous mettons la lumière sur les résultats expérimentaux obtenus en terme de robustesse et d'imperceptibilité et nous les comparons avec les méthodes de l'état de l'art.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons une technique robuste et aveugle de tatouage de maillages 3D basée sur la quantification des normes de coefficients d'ondelettes et la saillance de maillages pour la protection des droits d'auteurs. Nous décrivons par la suite le schéma global de tatouage contenant l'insertion et l'extraction de tatouage. Nous y évaluons les performances de notre méthode en termes d'imperceptibilité et de robustesse et nous les comparons aux méthodes de l'état de l'art dans la partie des résultats expérimentaux.

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les notions de base du tatouage numérique tout en se focalisant sur l'image et le maillage 3D comme support de tatouage. Nous y expliquons le schéma global de tatouage dans la section 1.2. Les contraintes de tatouage sont présentées dans la section 1.3. Les attaques possibles sur les images 2D et les maillages 3D sont présentées dans les sections 1.5.1 et 1.6.2. La modélisation géométrique des objets 3D, les domaines d'application et les métriques d'évaluation des schémas de tatouage sont décrites dans la section 1.5.2. Nous finissons ce chapitre par une classification des méthodes de tatouage d'images 2D et de maillages 3D décrites dans les sections 1.5.3 et 1.6.4, respectivement.

1.2 Schéma global

Le tatouage numérique, *Digital Watermarking* en Anglais, est l'art d'insérer une information supplémentaire appelée marque, ou encore *watermark* dans un contenu multimédia (audio, image, vidéo, Objet 3D, etc) (Urvoy *et al.*, 2014). Il est à noter que dans cette thèse, les travaux proposés utilisent les images 2D et les maillages 3D comme contenu multimédia. La marque insérée doit être imperceptible, c'est à dire que la distorsion causée par le processus d'insertion soit assez

minime de façon à ce qu'on ne peut pas différencier entre le contenu original et le contenu tatoué. Le tatouage numérique se compose de deux étapes principales : *l'insertion* et *l'extraction*. Entre ces deux étapes, le contenu multimédia est exposé aux différentes attaques aussi bien bienveillantes que malveillantes lors de sa transmission via le canal. La Figure 1.1 illustre le schéma global de tatouage dans le cas des images 2D et de maillages 3D. Afin d'insérer la marque dans l'image originale, une clé secrète est utilisée afin de renforcer la sécurité. Seuls l'émetteur et le récepteur autorisés ont accès à cette clé.

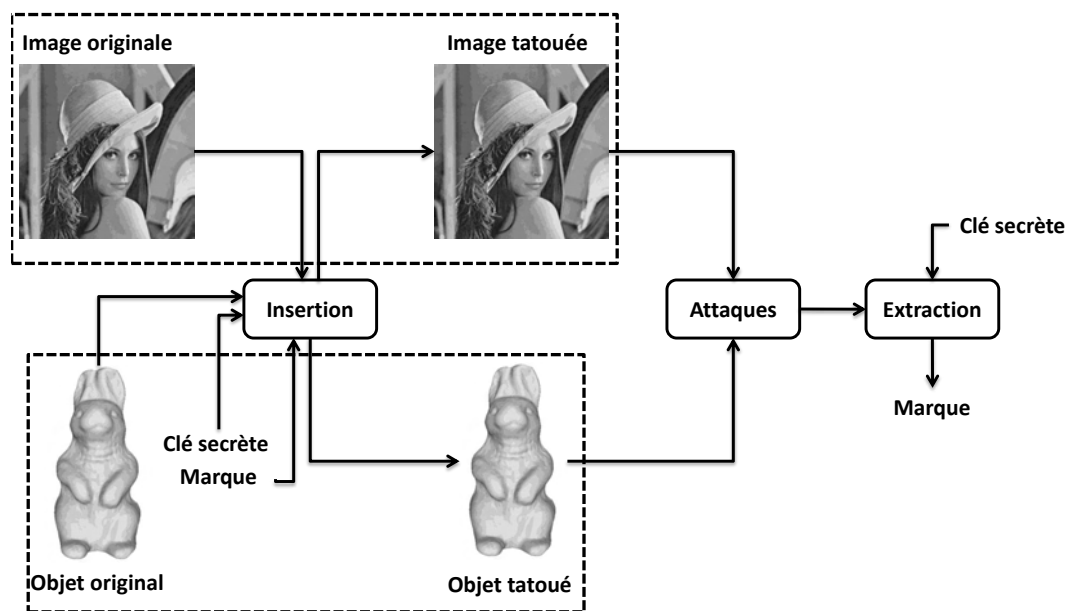


Figure 1.1 – Schéma général d'un système de tatouage numérique.

1.3 Contraintes de tatouage

Chaque système de tatouage doit assurer un bon compromis entre quatre contraintes principales : l'imperceptibilité, la capacité, la robustesse et la sécurité (Cox *et al.*, 2007). L'importance de chaque contrainte dépend essentiellement de l'application envisagée. Par exemple, pour la protection des droits d'auteur "Co-

pyright protection”, la contrainte de robustesse est primordiale. Il est à noter que ces quatre contraintes sont les mêmes quel que soit le contenu multimédia (image 2D ou objet 3D).

La première caractéristique importante d’un système de tatouage d’image est l’imperceptibilité. Elle fait référence à la similarité perceptuelle entre l’image d’origine et l’image tatouée. En effet, un bon système de tatouage ne devrait pas produire de perte de qualité dans les images ou les objets 3D. Autrement dit, la distorsion causée par le mécanisme d’insertion de la marque ne doit pas être visible à l’œil nu. Si le schéma de tatouage n’atteint pas cette exigence, il ne sera pas pratique pour les applications courantes.

La deuxième caractéristique est la capacité. Elle représente le nombre de bits maximal que peut contenir la marque insérée dans le contenu original. La capacité est pratiquement mesurée en bits par primitive. Dans le cas des images, elle peut être mesurée par exemple en bits par pixel. Pour les maillages 3D, elle peut être exprimée en bits par sommet ou par facette. Dans l’application de tatouage de haute capacité appelé aussi ”enrichissement de contenu”, la contrainte de capacité est la caractéristique majeure que le système doit assurer. Pour d’autres applications telles que l’authentification et la protection des droits d’auteur, la robustesse de la marque est la propriété cruciale.

La troisième caractéristique est la robustesse. Elle peut être définie comme étant la capacité de résister aux manipulations que le contenu peut subir lors de sa transmission à savoir les manipulations bienveillantes comme une compression JPEG, ou les manipulations malveillantes qui ont pour but la modification ou la suppression de la marque insérée comme le filtrage, ou la coupe.

La dernière caractéristique qui est la sécurité, représente la capacité de rendre la marque inaccessible sans utilisation d’une clé secrète (Cox *et al.*, 2007). La sécurité d’un système de tatouage peut être définie comme étant la difficulté qu’aura

un utilisateur non-authorized à retrouver le tatouage inséré ou à le supprimer. Elle repose généralement sur l'utilisation d'une clé secrète. Cette dernière est utilisée à la fois dans l'insertion et l'extraction de la marque. Il s'agit généralement d'une séquence pseudo-aléatoire. On peut parler aussi de deux niveaux de sécurité. Le premier consiste au fait qu'un utilisateur mal-intentionné ne pourra pas lire le message inséré sans l'utilisation d'une clé secrète. Le second niveau de sécurité réside dans le fait que le message incrusté est crypté à l'aide d'une clé secrète et ne pourra pas être lu qu'avec une clé additionnelle. Ce dernier niveau représente une couche supplémentaire augmentant la sécurité du système de tatouage conçu.

Il est à noter que ces caractéristiques sont contradictoires. Par exemple, plus l'intensité d'insertion de la marque est importante plus la robustesse est élevée, et plus la qualité visuelle du contenu tatoué est dégradée. Une insertion redondante de la marque peut considérablement renforcer la robustesse, mais en même temps, la capacité diminue inévitablement.

1.4 Applications

Les caractéristiques discutées dans la section 1.3, font du tatouage un choix idéal pour plusieurs applications telles que la *protection des droits d'auteur*, l'*authentification*, le *contrôle de diffusion*, la *protection contre la copie*, etc. L'importance relative de ces caractéristiques dépend de l'application pour laquelle le système est conçu.

Protection des droits d'auteur

La protection des droits d'auteur est l'application la plus commune du tatouage numérique puisqu'elle offre une bonne alternative à la cryptographie. En effet, le tatouage fournit une protection permanente même après diffusion. Le contenu

tatoué ainsi portera toujours la marque de son propriétaire. Cette marque servira en cas d'utilisation non autorisée d'un pirate à prouver les droits du propriétaire. La marque est généralement sous forme d'identifiant ID, logo ou encore le nom du propriétaire, et elle doit être suffisamment robuste à une grande variété d'attaques. Par exemple, un constructeur automobile peut insérer son identifiant numérique dans les modèles 3D des pièces de voiture qu'il a conçu. La marque insérée est utilisée par la suite pour prouver les propriétés légales du constructeur de ces pièces. Une marque de 64 bits est largement suffisante pour prouver le document en cas de conflit (Kutter et Petitcolas, 1999). Il est à noter que nos trois contributions présentées dans cette thèse rentrent dans le cadre de cette application.

L'authentification

De nos jours, il est devenu très facile de modifier ou falsifier les images et les objets 3D grâce aux outils de traitement d'image ou de maillage comme *Adobe Photoshop* et *MeshLab* (Cignoni *et al.*, 2008). Si le contenu modifié contient un personnage public, un criminel dans une investigation policière ou encore un diagnostic par télé-médecine, le problème devient très critique. Afin de le surpasser, la marque est insérée dans le document original, et elle est utilisée par la suite pour vérifier si le document a été modifié ou non. La marque doit être fragile pour pouvoir détecter la simple modification du contenu tatoué. Si la détection de la marque échoue, on pourra conclure automatiquement que le contenu tatoué a été modifié. En pratique, les schémas de tatouage fragile appliqués dans l'authentification doivent non seulement être capable de détecter si le contenu est modifié ou non, mais ils doivent aussi localiser la zone d'altération (Qin *et al.*, 2017).



Figure 1.2 – La femme dans l'image à gauche a été supprimé de la scène, le résultat est dans l'image à droite. Cette opération ne nécessite que 10 minutes en utilisant l'outil Adobe Photoshop (Cox *et al.*, 2007).

Le contrôle de diffusion

En 1997, un scandale a été éclaté au Japon concernant la publicité télévisée. Les annonceurs ont payés des milliers de publicités qui n'ont été jamais diffusées Kilburn (1997). Cette pratique frauduleuse était restée pratiquement 20 ans car il existait pas de système permettant de surveiller la diffusion effective des publicités. Les annonceurs paient un prix élevé pour présenter leurs produits lors d'une pause publicitaire pendant les manifestations sportives importantes et les émissions célèbres. Les annonceurs ayant investit une fortune, veulent s'assurer que leurs annonces ont été effectivement diffusées dans les chaînes en question. Le rôle de la marque ici est de prouver que le contenu a été bien diffusé à un moment donné (Liu *et al.*, 2013).

Protection contre la copie

Il est devenu très facile de modifier, copier ou redistribuer un contenu multimédia sur Internet. Le but de cette application est d'empêcher la copie illégale d'un document protégé Cox *et al.* (2007). Elle est très utilisée dans la protection des DVD. La marque insérée indiquera si le document peut être recopiée. Notez qu'il faut que les lecteurs DVD soient équipés d'un détecteur de marque. Si la marque est présente, la copie du document sera interdite.

1.5 Tatouage d'images 2D

1.5.1 Attaques sur les images 2D

Entre l'insertion et l'extraction de la marque, le document tatoué est transmis ou partagé via un réseau non-sûr comme Internet. Cela s'accompagne naturellement d'éventuelles modifications qui peuvent être facilement réalisées à l'aide des outils de traitement d'image et de maillage. Ces modifications sont appelés *attaques*. Dans cette section, nous allons présenter une classification des attaques des images 2D. Les attaques appliquées aux images 2D peuvent être classifiées en quatre classes (Cox *et al.*, 2007) :

- Les attaques de suppression : on cite la *quantification*, le *filtrage*, l'*ajout de bruit*, etc. Ce type d'attaque a pour but la suppression de la marque insérée dans le contenu tatoué (Kutter et Petitcolas, 1999).
- Les attaques *cryptographiques*, comme les attaques *Oracle*, *brute force*.
L'attaque *Brute force* a pour but le déchiffrement de la sécurité de la marque, tandis que l'attaque *Oracle* essaie de créer un contenu non tatoué (Kutter et Petitcolas, 1999).
- Les attaques de protocole : ces attaques ajoutent la marque du pirate dans le contenu en question.
- Les attaques géométriques, notamment la rotation, mise en échelle et la translation. Ces attaques ont pour but la désynchronisation de la marque.

On distingue, dans une autre classification, entre attaques *bienveillantes* et attaques *malveillantes* (Potdar *et al.*, 2005). Dans la première catégorie, le document est modifié sans intention préalable de modifier la marque, on parle de compression avec perte (JPEG) par exemple. La deuxième catégorie d'attaques a pour but de modifier, voire supprimer la marque du document tatoué afin de rendre l'extraction quasi-impossible.

1.5.2 Métriques d'évaluation des schémas de tatouage

Pour évaluer la qualité des images 2D plusieurs métriques ont été proposées Kutter et Petitcolas (1999). Généralement, lorsque l'image originale est connue, une distance entre cette dernière et l'image modifiée est calculée. Le défi consiste à ajuster de manière perceptible la distance de telle sorte que la qualité prédite soit en accord avec les jugements de qualité effectués par l'homme.

Peak Signal to Noise Ratio(PSNR)

Le rapport signal sur bruit "*Peak Signal to Noise Ratio*" (*PSNR*), bien qu'il ne soit pas en corrélation avec la perception humaine, est la métrique la plus utilisée dans la littérature de tatouage d'images pour mesurer la distance entre l'image originale et l'image tatouée. Elle est définie comme suit :

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (1.1)$$

où *MAX* est la valeur maximale possible des pixels de l'image qui est égale à 255 pour une représentation en 8 bits. *MSE* (*Mean Square Error*) est exprimé comme suit :

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (1.2)$$

où $I(i, j)$ and $K(i, j)$ représentent l'image originale et l'image tatouée respectivement. Généralement, quand les distorsions diminuent la valeur du *PSNR* augmente.

Structural Similarity Index (SSIM)

L'index de similarité structurelle (*SSIM*), en Anglais "*Structural Similarity Index*", effectue une mesure de similarité structurelle entre les deux images, contrairement au *PSNR* qui calcule la distance pixel par pixel entre ces dernières. Le

SSIM évalue la qualité de l'image en combinant trois facteurs : le contraste, la luminosité et la comparaison de structure. C'est la métrique de qualité perceptuelle la plus influente (Wang *et al.*, 2004).

$$SSIM(I_0, I_w) = \frac{(2\mu_{I_0}\mu_{I_w} + c_1)(2\sigma_{I_0I_w} + c_2)}{(\mu_{I_0}^2 + \mu_{I_w}^2 + c_1)(\sigma_{I_0}^2 + \sigma_{I_w}^2 + c_2)} \quad (1.3)$$

où I_0 et I_w sont respectivement l'image originale et l'image tatouée, μ_{I_0} and μ_{I_w} sont leurs moyennes locales, $\sigma_{I_0}^2$ et $\sigma_{I_w}^2$ sont leurs variances, quant à c_1 et c_2 sont deux variables de stabilisation de division avec faible dénominateur.

Corrélation Normalisée (NC)

La robustesse représente la capacité d'une méthode de tatouage de résister aux attaques auxquelles elle peut être exposée. La marque doit être capable de faire face aux différentes attaques communes à savoir les attaques de suppression et les attaques géométriques, etc. La corrélation normalisée (*NC*), *Normalized Correlation* en Anglais, est une mesure très utilisée pour évaluer la robustesse de la technique de tatouage étudiée face aux différentes attaques (Cox *et al.*, 2007). Sa valeur varie entre -1 quand les deux marques sont totalement décorréliées, et 1 quand les deux marques sont identiques. Elle mesure la similarité entre la marque extraite $W'(i, j)$ et la marque originale $W(i, j)$ et elle s'exprime comme suit :

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [W(i, j) \times W'(i, j)]^2}{\left(\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [W(i, j)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [W'(i, j)]^2} \right)} \quad (1.4)$$

où M et N représentent les dimensions de la marque.

1.5.3 Classification des schémas de tatouage d'images 2D

Plusieurs critères sont utilisés pour classifier les schémas de tatouage d'images notamment le domaine d'insertion, la robustesse, le mode d'extraction, etc. Plusieurs classifications peuvent être faites pour les techniques de tatouage d'images 2D. Selon le domaine d'insertion les schémas de tatouages peuvent être divisés en deux groupes : les schémas opérant sur le domaine spatial et ceux opérant sur le domaine fréquentiel. Les schémas de tatouage sont aussi classifiés selon la robustesse : on distingue entre méthodes robustes (Singh, 2017), fragiles (Xiao et Shih, 2012) et semi-fragiles (Qi et Xin, 2011). Selon l'extraction, on distingue entre schéma aveugle (Wang *et al.*, 2016), semi-aveugle (Gupta *et al.*, 2018) et non-aveugle (Tsui *et al.*, 2008) selon la nécessité ou non de l'image originale. Dans une autre classification, on distingue entre les méthodes se basant sur une seule transformée (Cox *et al.*, 1997) et les méthodes hybrides (Thanki *et al.*, 2019) combinant plusieurs transformées.

1.5.3.1 Domaine spatial

Les premières techniques de tatouage d'images ont été proposées dans le domaine spatial. Les méthodes de ce type insèrent directement la marque dans l'intensité lumineuse du pixel en modifiant sa valeur. La méthode la plus célèbre dans la littérature est la méthode " *Least Significant Bit*" (LSB) qui consiste à modifier les bits du poids faible des pixels de l'image. Cette méthode a été proposée initialement par Tanaka *et al.* (1990). Chaque pixel de l'image codé sur 8 bits est représenté par un vecteur $v = (b_1, b_2, \dots, b_8)$ et le bit de la marque est inséré dans le bit du poids faible b_8 . Karybali et Berberidis (2006) ont proposé une méthode de tatouage d'images qui utilise un masque perceptuel qui corrèle avec le système visuel humain (HVS) " *Human Visual System*". Une autre méthode dans le domaine spatial est proposée par Park *et al.* (2008). Son objectif est de permettre la détec-

tion et la localisation des régions falsifiées de l'image tatouée. Une clé privée est utilisée pour permuter aléatoirement les blocs de l'image partitionnée. La marque est insérée en modifiant le bit b_7 et b_8 pour chaque pixel de l'image. Les méthodes de tatouage des images basées sur LSB ont montré leur faiblesse. Zeki et Manaf (2009) ont proposé une étude comparative de l'influence de l'insertion de la marque sur différents plan du pixel allant du bit b_8 au bit b_1 . La conclusion tirée de cette étude est que le quatrième bit b_4 appelé aussi le "bit intermédiaire" (ISB) est le meilleur endroit d'insertion de la marque afin d'assurer un bon compromis entre la robustesse et l'imperceptibilité.

Récemment, Su et Chen (2018) ont proposé une méthode de tatouage des images couleurs pour la protection des droits d'auteur. La marque est insérée dans la composante bleue de l'espace RGB du domaine spatial au lieu du domaine fréquentiel. La méthode résiste à la compression JPEG, l'ajout de bruit et à la coupe.

L'une des techniques les plus utilisées en télécommunications est *l'étalement de spectre* (Cox *et al.*, 1997) (Ruanaidh et Pun, 1998). Son principe est d'étaler le message sur toute la bande passante du canal. En conséquence, le message sera présent sur toutes les fréquences et sera plus robuste aux modifications de cette bande. L'étalement de spectre est effectué en utilisant une modulation par une séquence pseudo aléatoire de fréquence supérieure. Cette technique est très utilisée dans les schémas de tatouage additifs. Tirkel *et al.* (1993) Van Schyndel *et al.* (1994) étaient les premiers à proposer une méthode de tatouage à base d'étalement de spectre.

En résumé, les techniques spatiales sont faciles à implémenter, moins coûteuses en termes de calcul et permettent d'assurer une très bonne imperceptibilité, mais leur robustesse est très faible. En effet, une simple modification de l'image (permutation des bits par exemple) peut causer la suppression totale de la marque.

C'est pour cela que la plupart des techniques de tatouage utilisent l'insertion dans le domaine fréquentiel.

1.5.3.2 Domaine fréquentiel

La plupart des méthodes de tatouage d'images numériques proposées sont des méthodes fréquentielles. En effet, le domaine fréquentiel offre beaucoup plus de robustesse et d'imperceptibilité comparé au domaine spatial (Briassouli et Strintzis, 2004). Les techniques du domaine fréquentiel utilisent une transformation qu'elles appliquent sur l'image originale et insèrent la marque en modifiant les coefficients de cette dernière. Parmi les transformées populaires utilisées dans les algorithmes de tatouage numérique on cite la transformée en cosinus discrète (DCT) (Barni *et al.*, 1998), la transformée de Fourier discrète (DFT) (Tang et Hang, 2003), la transformée en ondelettes discrète (DWT) (Barni *et al.*, 2001), etc.

La transformée en cosinus discrète (DCT) est l'une des transformations les plus utilisées pour transformer une image du domaine spatial au domaine fréquentiel Khayam (2003). Cette technique a été largement utilisée dans le domaine de traitement d'image en exploitant à la fois les propriétés de décorrélation et de compactage d'énergie. En général, les approches de tatouage qui se basent sur la DCT utilisent une matrice carrée de taille 8×8 comme celle utilisée dans la compression JPEG (Cox *et al.*, 1997). Les expressions mathématiques de la 2D-DCT et 2D-DCT inverse sont respectivement :

$$DCT(u, v) = \frac{2}{\sqrt{mn}} \alpha(u) \alpha(v) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \times \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2m} \times \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2n} \quad (1.5)$$

$$f(x, y) = \frac{2}{\sqrt{mn}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \alpha(u)\alpha(v)DCT(u, v) \times \cos\frac{(2x+1)u\pi}{2m} \times \cos\frac{(2y+1)v\pi}{2n} \quad (1.6)$$

où $f(x, y)$ et $DCT(u, v)$ sont respectivement, les valeurs des pixels dans le domaine spatial et les coefficients DCT. m et n représentent la taille du bloc. M et N sont les dimensions de l'image.

$$\alpha(u)\alpha(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{si } (u, v) = 0 \\ 1 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (1.7)$$

Plusieurs méthodes de tatouage numérique d'images basées sur la DCT ont été proposées dans la littérature. L'un des schémas de tatouage les plus populaires est introduit par Cox *et al.* (1997) où une séquence gaussienne pseudo-aléatoire est insérée dans les 1000 plus grands coefficients du domaine DCT.

Barni *et al.* (1998) présentent un algorithme de tatouage d'images aveugle dans le domaine fréquentiel qui insère une marque pseudo-aléatoire dans un ensemble de coefficients DCT. L'insertion est réalisée en prenant en compte les caractéristiques du système visuel humain afin d'assurer l'invisibilité de la marque. Les résultats expérimentaux montrent la robustesse de la méthode face aux attaques du type traitement de signal.

Une méthode d'authentification d'images numériques est proposée par Hsu et Wu (1999). La méthode proposée qui insère la marque en modifiant les fréquences moyennes de la DCT, a montré sa robustesse contre la coupe et la compression JPEG. Pour améliorer la robustesse contre la compression JPEG, les dernières techniques proposées insèrent le tatouage dans les basses fréquences de l'image. Cependant, ces composantes contiennent des informations importantes de l'image et leur modifications peut dégrader considérablement la qualité de l'image après

insertion de tatouage.

Pour remédier à ce problème, Lin *et al.* (2010) proposent une insertion de tatouage qui ajuste les coefficients DCT de basses fréquences. Les résultats démontrent que la méthode est robuste à la compression JPEG avec des taux de compression élevés.

Das *et al.* (2014) ont présenté une technique aveugle de tatouage d'images dans le domaine DCT basée sur la corrélation entre les coefficients DCT des blocs adjacents. Un seul coefficient DCT de chaque bloc est modifié de façon à ce que la différence par rapport au coefficient du bloc adjacent reste dans une plage bien précise. Les tests ont montré une bonne résistance aux attaques JPEG, rotation, la coupe, etc.

La transformée de Fourier discrète d'une image conduit à une représentation de la magnitude (module) et de la phase (Poljicak *et al.*, 2011). Cette transformation a plusieurs caractéristiques. Une propriété importante de la DFT est son invariance à la translation. En fait, les déplacements spatiaux n'affectent pas la magnitude, mais plutôt la composante de phase Pereira et Pun (2000). La DFT est également robuste à la coupe. La transformée de Fourier discrète d'une image $f(x, y)$ de taille $M \times N$ et la DFT inverse (IDFT) sont définies respectivement comme suit :

$$\begin{aligned} F(u, v) &= \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-2\pi j(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \\ &= R(u, v) + jI(u, v) \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{2\pi j(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (1.9)$$

où $R(u, v)$ et $I(u, v)$ sont la partie réelle et la partie imaginaire, respectivement. L'équation ci-dessous montre la représentation polaire de la transformée de Fou-

rier :

$$F(u, v) = |F(u, v)| e^{j\phi(u, v)} \quad (1.10)$$

où $|F(u, v)|$ et $\phi(u, v)$ sont respectivement le module et la phase de Fourier. Ils sont exprimés comme suit :

$$M(u, v) = |F(u, v)| = [R^2(x, y) + I^2(x, y)]^{1/2} \quad (1.11)$$

$$\phi(u, v) = \tan^{-1} \left[\frac{I(u, v)}{R(u, v)} \right] \quad (1.12)$$

O'Ruanaidh et Pun (1997) ont proposé une méthode de tatouage d'image invariante à la translation, la rotation et la mise en échelle. La marque est insérée en utilisant la transformée de Fourier-Mellin offrant une bonne robustesse aux attaques géométriques (rotation, translation et mise en échelle). Néanmoins, la méthode montre une faible résistance à la compression JPEG ainsi qu'à la coupe.

Solachidis et Pitas (2001) ont proposé une méthode de tatouage d'images robuste aux transformations géométriques. La marque est insérée dans un anneau du domaine DFT en utilisant une clé secrète. La méthode est robuste à la compression JPEG, le filtrage, l'ajout de bruit, la mise en échelle, etc.

Un schéma de tatouage d'images dont le but est de résister à la fois aux distorsions géométriques et aux attaques de traitement du signal a été proposé (Tang et Hang, 2003). Le schéma combine l'extraction des caractéristiques de l'image et sa normalisation afin d'insérer la marque. Ce schéma est robuste à la compression JPEG, rotation, filtrage gaussien, etc.

La dégradation de l'image après avoir inséré un tatouage est étudiée dans le travail de Poljicak *et al.* (2011). La marque est insérée dans les magnitudes de la DFT en choisissant un rayon optimal qui permet de minimiser la dégradation de

la qualité de l'image.

Une méthode de tatouage robuste dans laquelle la marque est insérée au niveau du module des moyennes fréquences de la transformée de Fourier discrète (DFT) (Cedillo-Hernandez *et al.*, 2012). Afin de permettre une détection correcte de la marque, le descripteur "*Speeded Up Robust Feature*" (SURF) est utilisé. Pendant le processus d'insertion, les points SURF sont estimés et stockés à l'avance pour être utilisés dans l'extraction. La méthode est robuste aux distorsions géométriques et manipulations de type traitement de signal.

Un schéma de tatouage robuste basé sur la DFT avec une visibilité perceptuelle optimale est proposé (Urvoy *et al.*, 2014). Le tatouage est inséré par substitution dans le domaine de Fourier. La composante d'amplitude ajuste la puissance du tatouage quant à la composante de phase contient les informations. Un modèle perceptuel du système visuel humain (HVS) basé sur la fonction de sensibilité au contraste est utilisé pour déterminer la puissance optimale d'insertion de la marque.

La transformée en ondelettes discrète est très utilisée dans les schémas de tatouage numérique d'images. Les caractéristiques multirésolution similaire au système visuel humain (HVS) d'une part, et l'excellente localisation spatiale d'autre part, sont les caractéristiques les plus attractives qui motivent les chercheurs à l'utiliser dans le domaine de tatouage d'images (Al-Haj, 2007). La transformée en ondelettes permet de décomposer l'image en quatre sous-bandes LL1, LH1, HL1 et HH1. La bande LL1, dite de basse fréquence, décrit l'approximation de l'image originale. Les bandes de haute fréquence LH1, HL1 et HH1 représentent les détails horizontaux, verticaux et diagonaux de l'image respectivement. Le processus peut ensuite être répété pour calculer plusieurs décompositions en ondelettes selon l'application envisagée en décomposant à chaque fois la bande LL. Ce domaine offre des avantages supplémentaires, tels que la robustesse, la tolérance à divers algo-

rithmes de compression et de filtrage, à condition que la marque soit insérée dans des régions moins sensibles au (HVS), telles que les bandes de détails de haute résolution LH1, HL1 et HH1. La Figure 1.3 montre un exemple de décomposition en ondelettes d'une image en deux niveaux de résolution.

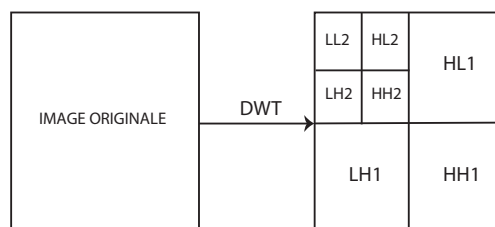


Figure 1.3 – Deux niveaux de décomposition en ondelettes d'une image.

Dans l'article de Xia *et al.* (1997), une méthode de tatouage multirésolution pour les images numériques est présentée. La méthode est basée sur la transformée en ondelettes discrète (DWT). L'insertion de la marque est réalisée en insérant des codes pseudo-aléatoires dans les plus grands coefficients de moyennes et hautes fréquences de la DWT.

Un algorithme de tatouage opérant dans le domaine des ondelettes est présenté dans le travail de Barni *et al.* (2001). L'amélioration des performances d'insertion de la marque est réalisée en prenant en considération les caractéristiques du système visuel humain (HVS). Contrairement aux méthodes classiques fonctionnant dans le domaine des ondelettes, le masquage est accompli pixel par pixel en prenant en compte la texture et la luminance de toutes les sous-bandes de l'image. La marque, composée d'une séquence pseudo-aléatoire, est ajoutée de manière adaptative aux bandes de détails les plus grandes.

Une méthode de tatouage basée sur l'arborescence d'ondelettes utilisant le vecteur de distance d'un cluster binaire pour la protection des droits d'auteur est présentée (Lin *et al.*, 2009). Les arbres d'ondelettes sont classés en deux groupes en utilisant le vecteur de distance pour indiquer les bits de la marque à insérer.

Les deux plus petits coefficients d'ondelette dans un arbre d'ondelettes sont utilisés pour réduire la distorsion de l'image tatouée. Les arbres sont classés en deux groupes de manière à présenter une différence statistique suffisamment grande sur la base du vecteur de distance. Cette différence est ensuite utilisée pour l'extraction de la marque. Les résultats expérimentaux montrent que le schéma donne de bons résultats en termes d'imperceptibilité et de robustesse notamment contre les attaques de traitement d'image.

Wang et Lin (2004) ont proposé un schéma de tatouage aveugle basé sur un arbre d'ondelettes pour la protection des droits d'auteur. Les coefficients d'ondelettes de l'image originale sont regroupés dans ce qu'on appelle des super arbres et la marque est insérée en quantifiant ces derniers. La quantification est réalisée de façon à ce que les arbres présentent une différence statistique assez grande qui va être utilisée dans l'extraction de la marque. La méthode est robuste aux attaques géométriques.

Un algorithme de tatouage aveugle et robuste basé sur la quantification des coefficients d'ondelettes pour la protection des droits d'auteur est proposé (Sahraee et Ghofrani, 2013). Les coefficients d'ondelettes sont quantifiés en fonction des bits de la marque à insérer. Cette méthode offre une bonne imperceptibilité et assure une résistance aux attaques géométriques et non géométriques.

Toutes ces solutions sont basées sur une seule transformée et insèrent le tatouage dans des coefficients sélectionnés afin d'accroître la robustesse face à une large gamme d'attaques tout en préservant une bonne qualité visuelle des images ont montré leurs limitations. Par conséquent, la nécessité de développer des méthodes hybrides combinant deux transformées ou plus pour bénéficier des caractéristiques de ces dernières et atteindre les objectifs requis a considérablement augmenté (Singh *et al.*, 2017a).

Un algorithme de tatouage aveugle basé sur la transformation en ondelettes

discrète (DWT) et la transformation en cosinus discrète (DCT) est proposé (Feng *et al.*, 2010). La marque est cryptée en utilisant la transformation d'Arnold. Le bloc DCT de la sous-bande LL de la DWT est calculé et la séquence pseudo-aléatoire de la marque est insérée dans les fréquences moyennes des blocs DCT correspondants afin d'assurer un bon compromis robustesse-imperceptibilité.

Ali *et al.* (2014) ont proposé un algorithme de tatouage basé sur l'évolution différentielle (DE) pour équilibrer le compromis entre robustesse et imperceptibilité. D'abord, l'image originale est partitionnée en blocs qui sont transformés au domaine DCT. Ensuite, les coefficients DC de chaque bloc sont collectés pour construire une image d'approximation de basse résolution et la décomposition en valeurs singulières (SVD) est appliquée à cette dernière. Finalement, la marque est insérée en modifiant les valeurs singulières de l'image avec les valeurs singulières de la marque. Cette dernière est cryptée en utilisant la transformation d'Arnold. Les résultats expérimentaux montrent que le schéma proposé maintient un bon compromis robustesse-imperceptibilité.

Roy et Pal (2017) ont proposé un schéma de tatouage d'images aveugle basé sur RDWT-DCT utilisant la transformée d'Arnold. Tout d'abord, l'image originale est décomposée en blocs non chevauchés et la RDWT (Redondant Discrete Wavelet Transform) est appliquée pour chaque bloc. Le tatouage est crypté à l'aide de la transformée d'Arnold afin d'accroître la sécurité. Ensuite, la DCT est appliquée à chaque sous-bande gauche du bloc d'image originale. Enfin, le tatouage est inséré en modifiant les coefficients significatifs. La méthode s'avère robuste contre les attaques géométriques et la compression JPEG.

Une technique de tatouage d'image semi-aveugle basée sur la combinaison de la NSCT (non sub-sampled contourlet transform), RDWT (redundant discrete wavelet transform) et de la SVD est proposée (Singh *et al.*, 2017b). Le cryptage utilisé par le biais de la transformation d'Arnold a pour but de renforcer la sécurité

du système de tatouage. Pour l'insertion de la marque, l'image originale est sous-échantillonnée, suivie d'un seul niveau de décomposition NSCT et RDWT. La SVD est appliquée par la suite aux coefficients RDWT obtenus. Cette méthode est robuste face aux attaques géométriques et aux attaques de traitement du signal.

Une méthode de tatouage d'image robuste et aveugle basée sur DWT-SVD et DCT utilisant le cryptage d'Arnold pour la protection des droits d'auteur est proposée (Singh et Singh, 2017). Les coefficients DCT de la marque sont insérés dans les valeurs singulières moyennes de chaque bloc 4×4 du premier niveau de la transformée en ondelettes discrète de l'image originale. Ce schéma de tatouage est imperceptible et robuste face aux opérations de traitement de signal communes.

Un schéma de tatouage des images aveugle basé sur la combinaison des transformations DCT, SVD et DWT est proposé afin d'optimiser le compromis robustesse-imperceptibilité (Kang *et al.*, 2018). D'abord, l'image de couverture est décomposée en quatre sous-bandes utilisant DWT et la sous-bande de basse fréquence LL est partitionnée en blocs non chevauchés. Ensuite, la DCT est appliquée à chaque bloc et plusieurs coefficients DCT de moyenne fréquence sont extraits pour former une matrice de modulation. Cette dernière est utilisée pour insérer les bits de la marque en modifiant les valeurs singulières les plus grandes. Finalement, la puissance optimale du tatouage est obtenue à partir d'une estimation basée sur l'ajustement de la courbe des moindres carrés permettant d'offrir un bon compromis entre l'imperceptibilité et la robustesse. Les résultats expérimentaux montrent l'invisibilité de la marque et sa résistance aux attaques géométriques et aux attaques de traitement du signal.

Récemment, un algorithme de tatouage numérique d'images hybride et aveugle est proposé pour la protection des droits d'auteur (Thanki *et al.*, 2019). Le schéma est basé sur la transformée en curvelet discrète (DCuT) et la transformée en ondelettes discrète redondante (RDWT). Les bits de la marque sont insérés en

modifiant les coefficients d'ondelettes de la sous-bande à gauche en utilisant des séquences pseudo-aléatoire en fonction du facteur de gain. Les résultats expérimentaux montrent que le schéma peut atteindre un bon compromis imperceptibilité-robustesse.

1.6 Tatouage de maillages 3D

1.6.1 Modélisation géométrique d'objets 3D

La modélisation géométrique s'intéresse à la représentation des objets 3D réels. Plusieurs représentations existent pour modéliser un objet 3D, notamment les modèles non structurés, à savoir le nuage des points et les surfels, les modèles volumiques dont les voxels et les octrees sont les formes les plus utilisées, et les modèles surfaciques comme les maillages surfaciques et les surfaces implicites (Mabrouk *et al.*, 2019). Bien qu'il existe plusieurs représentations d'objets 3D, le maillage 3D est devenu la représentation standard grâce à sa simplicité algébrique et sa facilité de conversion vers les autres représentations (Wang *et al.*, 2008a). Cette dernière, est la représentation adoptée dans notre thèse.

Modèles non structurés

La représentation la plus naturelle d'un objet 3D est le nuage des points. Chaque point dans le nuage est représenté par ses coordonnées cartésiennes. Cette représentation est obtenue généralement à l'aide de scanner. Il est à noter que ces points ne sont pas connectés entre eux et représentent la géométrie de l'objet. La Figure 1.4 présente un exemple de nuage de points de l'objet main.

Surfel qui est l'abréviation de *SURFace ELeMent* où encore *élément de surface* est une surface orientée qui donne une approximation locale à la surface de l'objet 3D. Les Surfels peuvent être considérés comme une extension des nuages de points



Figure 1.4 – Exemple de nuage de points de l'objet main.

permettant l'affichage des objets 3D texturés où à chaque point est associé une surface qui se compose d'une couleur ou d'une texture. Un exemple de représentation en surfel est illustré dans la Figure 1.5.



Figure 1.5 – Exemple de représentation en surfel de l'objet visage.

Modèles volumiques

Plusieurs représentations de modèles volumiques existent, on cite les représentations les plus communes : les voxels et les octrees. Ces représentations sont construites généralement à base de combinaisons de primitives comme les sphères,

les cylindres ou encore les cubes. Une autre représentation qui se base sur différentes primitives est l'arbre CSG (Constructive Solid Geometry) qui peut être utilisée aussi pour modéliser un modèle volumique 3D. Voxel qui est l'abréviation de *Volume Element* appelé aussi *élément de volume* est la représentation la plus intuitive à base de volumes utilisée pour décrire la forme des objets 3D. La Figure 1.6 illustre un exemple des représentation à base de voxels. L'inconvénient majeur de cette modélisation réside dans le fait que la taille des fichiers est généralement grande. Ce problème est dû essentiellement à l'augmentation de la résolution afin de bien définir les contours de l'objet. La représentation en octree peut être consi-

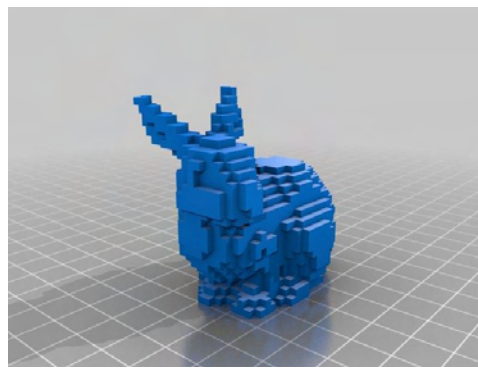


Figure 1.6 – Exemple de représentation en voxels.

dérée comme une hiérarchisation des voxels. Elle a pour but l'augmentation de la résolution des zones choisies en divisant le voxel en plusieurs voxels de petite taille. Cette division se traduit en découpage en cubes de tailles variables à l'aide d'un arbre. Pour surpaser la majeure limitation des voxels, l'utilisation des octrees permettra une réduction considérable de la taille du fichier. La Figure 1.7 illustre un exemple de représentation en octree.

Modèles surfaciques

Le maillage surfacique est une représentation très utilisée pour modéliser la surface d'objets 3D. Un maillage 3D est constitué de trois primitives principales :

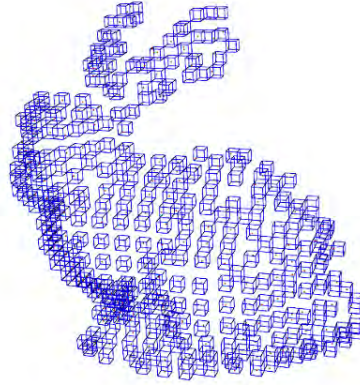


Figure 1.7 – Exemple de représentation en octree.

les *sommets*, les *arêtes* et les *facettes*. La *géométrie* du maillage est constituée des sommets, tandis que les arêtes et les facettes représentent sa *connectivité*. Un maillage M contenant N_S sommets et N_A arêtes peut être exprimé comme suit : $M = (S, A)$ où :

$$S = \{v_i = (x_i, y_i, z_i) \in \mathbb{R}^3 \mid i \in \{1, 2, \dots, N_S\}\} \quad (1.13)$$

$$A = \{a_j := (P_1^{(j)}, P_2^{(j)}) \mid j \in \{1, 2, \dots, N_A\}; P_1^{(j)}, P_2^{(j)} \in \{1, 2, \dots, N_S\}\} \quad (1.14)$$

où v_i est le sommet du maillage exprimé en 3D (x_i, y_i, z_i) , le couple de sommets $\{P_1^{(j)}, P_2^{(j)}\}$ représente l'arête reliant ces derniers. Le *degré* d'une facette est le nombre d'arêtes qui la compose, tandis que la *valence* d'un sommet est le nombre de ses arêtes incidentes. Les facettes du maillage peuvent être des triangles ou quadrangles, or la représentation triangulaire est la plus commune grâce à sa simplicité ainsi que sa facilité d'affichage dans les cartes vidéos. Un maillage est dit *triangulaire* si toutes ses facettes sont des triangles. Un maillage est dit *régulier*

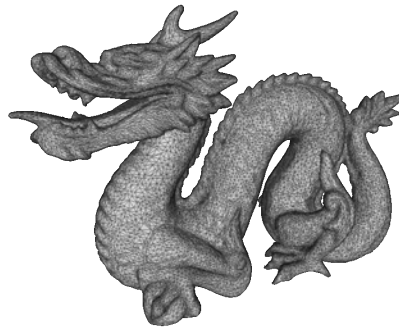


Figure 1.8 – Exemple de représentation en maillage triangulaire de l’objet Dragon.

si tous ses sommets ont la même valence, généralement égale à 6, *semi-régulier* si la majorité des sommets, mais pas tous, ont la même valence. Le maillage est *irrégulier* si tous les sommets ont des valences différentes. Dans certains cas, la structure du maillage est assez importante. En effet, pour les contributions où nous avons utilisé la transformée en ondelettes, le maillage utilisé est semi-régulier pour pouvoir appliquer l’analyse multi-résolution. La Figure 1.8 illustre un exemple de maillage triangulaire de l’objet Dragon.

1.6.2 Attaques sur les maillages 3D

Les attaques sur les maillages 3D peuvent être divisées en trois sous types : les *attaques géométriques* qui incluent les transformations de similarité ainsi qu’aux attaques de traitement de signal, les *attaques de connectivité*, et un dernier sous type d’attaque incluant les attaques de *fichier*, de *format* et de *représentation* (Wang *et al.*, 2007).

1.6.2.1 Les attaques géométriques

Ce type d’attaque ne modifie que la partie géométrique du maillage tatoué. A l’instar de la nature du changement géométrique appliqué, l’attaque se traduit par

une modification de la position des sommets.

a) Les attaques de type *traitement de signal* :

Un maillage peut être considéré comme un signal dans l'espace 3D. En conséquence, on peut lui appliquer les techniques de traitement du signal unidimensionnelles traditionnelles comme *l'ajout de bruit aléatoire, la quantification, le lissage, la compression, etc.*

b) Les transformations de similarité :

Ce sont les manipulations les plus communes et le plus souvent appliquées aux maillages 3D. Elles sont composées de rotation, translation et mise en échelle ou encore la combinaison de ces dernières.

1.6.2.2 Les attaques de connectivité

Cette classe d'attaque inclue *la coupe, le remaillage, la simplification, et la subdivision*. Les attaques de connectivité modifient non seulement les sommets mais aussi les relations d'adjacence entre ces derniers. Dans ces opérations, toutes les primitives du maillage, à savoir les sommets, les facettes et les arêtes peuvent être supprimés du maillage tatoué, pendant que d'autres peuvent être y ajoutés. Ce type d'attaque ne causera pas de modification sur la forme globale de l'objet mais peut causer une sévère désynchronisation de la marque. La Figure 1.9 montre quelques exemples d'attaques géométriques et de connectivité appliquées à l'objet Rabbit.

1.6.2.3 Autres attaques

Ce groupe contient principalement trois types d'attaques : les attaques de *fichier*, les attaques de *format* et les attaques de *représentation*. L'attaque de *fichier* consiste à réorganiser les sommets et/ou les facettes du maillage dans le fichier de description de celui-ci. L'attaque de *format* modifie la structure de donnée

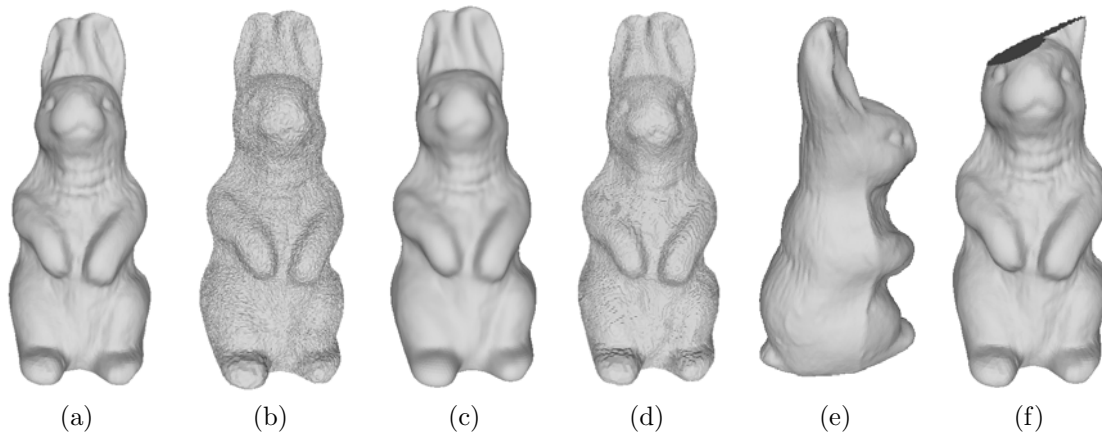


Figure 1.9 – Exemple d’attaques appliquées sur l’objet Rabbit : (a) maillage original, (b) après ajout de Bruit, (c) après lissage , (d) après quantification , (e) après transformation de similarité, (f) après coupe.

du maillage, ce qui en découle un changement dans l’ordre des sommets et/ou des facettes. L’attaque de *représentation* est considérée comme l’attaque la plus destructive. En effet, après cette attaque le maillage ne pourrait plus exister, ce qui entraînerait une perte totale de l’information utile.

1.6.3 Métriques d’évaluation de tatouage de maillages 3D

La représentation des objets 3D sous forme de maillages est devenue très commune dans plusieurs domaine d’applications comme la conception assistée par ordinateur, l’image médicale ou encore les jeux vidéos (Vasic et Vasic, 2013). Il est tout à fait naturel que ces maillages soient exposés à différents traitements comme l’ajout de bruit, le lissage, la subdivision, parmi d’autres ayant un impact perceptible sur la qualité des objets. L’évaluation de la qualité des maillages a pour but de mesurer la qualité visuelle de ces derniers et répondre aux exigences des domaines d’applications visés. Afin d’évaluer les performances des schémas de tatouage de maillage 3D en termes d’imperceptibilité et de robustesse plusieurs métriques sont utilisées.

1.6.3.1 Maximum Root Mean Square Error (MRMS)

Les distorsions peuvent être mesurées *géométriquement* ou *perceptuellement*. Pour la mesure géométrique, la métrique MRMS "Maximum Root Mean Square Error" est très utilisée pour évaluer la qualité des maillages 3D Cignoni *et al.* (1998). En général, l'erreur quadratique moyenne (RMS) "Root Mean Square Error" d'une surface S à une autre surface S' est défini comme suit Wang *et al.* (2010) :

$$d_{RMS}(M, Mw) = \sqrt{\frac{1}{|M|} \int \int_{p \in M} d(p, Mw)^2 dM} \quad (1.15)$$

où p est un point de la surface S , $|S|$ est l'air de S et $d(p, S')$ représente la distance entre le point p et la surface S' . A noter que cette métrique n'est pas symétrique, ceci dit que $d_{RMS}(S, S') \neq d_{RMS}(S', S)$. La distance MRMS est définie par :

$$d_{MRMS} = \max(d_{RMS}(M, Mw), d_{RMS}(Mw, M)) \quad (1.16)$$

1.6.3.2 Distance de Hausdorff (HD)

Une autre métrique très utilisée est la distance de Hausdorff (Aspert *et al.*, 2002). Cette mesure de distance géométrique entre les surfaces est définie comme étant la distance euclidienne minimale d entre un point p d'une surface S et une autre surface S' . Elle s'exprime comme suit :

$$d(p, S') = \min_{p' \in S'} \|p - p'\| \quad (1.17)$$

La distance de Hausdorff entre deux surfaces S et S' est calculée par :

$$d(S, S') = \max_{p \in S} d(p, S') \quad (1.18)$$

Finalement, la distance de Hausdorff symétrique est donnée par :

$$H_d(S, S') = \max(d(S, S'), d(S', S)) \quad (1.19)$$

1.6.3.3 Mesh Structural Distortion Measure (MSDM)

En réalité, la distance géométrique entre deux maillages ne reflète pas correctement la différence visuelle entre ces derniers (Lavoué *et al.*, 2006). Il faut donc mettre en place une métrique perceptuelle afin de mesurer la distorsion visuelle causée par l'insertion du tatouage dans le maillage. Pour ce faire, la métrique *MSDM* "Mesh Structural Distortion Measure" est utilisée. Théoriquement, sa valeur est égale à 0 si les deux maillages sont identiques, et elle est égale à 1 si les deux maillages sont complètement différents. La formule mathématique de cette métrique s'exprime comme suit :

$$d_{MSDM}(M, M_w) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{LMSDM}(a_i, b_i)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \in [0, 1]. \quad (1.20)$$

d_{LMSDM} est la distance MSDM locale entre deux fenêtres locales a and b (des maillages M et M_w , respectivement), qui est exprimée comme suit :

$$d_{LMSDM}(a, b) = (0.4 \times Curv(a, b)^3 + 0.4 \times Cont(a, b)^3 + 0.2 \times Surf(a, b)^3)^{\frac{1}{3}}. \quad (1.21)$$

où *Curv*, *Cont* et *Surf* représentent, respectivement, les fonctions de courbure, contraste et de comparaison de structure.

1.6.3.4 Corrélation normalisée (NC)

La robustesse des schémas de tatouage des maillages est évaluée en calculant la corrélation entre la marque insérée et la marque extraite exprimée comme suit :

$$Corr = \frac{\sum_{i=1}^M (w'_i - \bar{w}^*)(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (w'_i - \bar{w}^*)^2 \cdot \sum_{i=1}^M (w_i - \bar{w})^2}} \quad (1.22)$$

1.6.4 Classification des techniques de tatouage de maillages 3D

Au cours de la dernière décennie, les objets 3D ont connu une utilisation accrue dans différents domaines d'application telles que l'imagerie médicale, la vision par ordinateur, les jeux vidéos et la réalisation des films. Ce fait est dû grâce aux avancées technologiques liées aux techniques de communications et de l'information à savoir l'amélioration de la capacité de traitement et de la puissance des ordinateurs personnels ainsi qu'à l'augmentation de la vitesse de transmission des réseaux informatiques. Ainsi, il est devenu nécessaire de concevoir des méthodes de tatouage de maillages 3D ayant pour but la protection des droits d'auteurs, l'authentification, etc. Les techniques de tatouages de maillages 3D existantes peuvent être classifiées en deux catégories principales selon où la marque est insérée. Le domaine spatial et le domaine fréquentiel (Wang *et al.*, 2008a). Les techniques du domaine spatial insèrent la marque en modifiant la *géométrie* ou la *connectivité* du maillage tandis que les techniques du domaine fréquentiel modifient les coefficients obtenus après avoir appliqué une *transformation* au maillage original.

Les méthodes de tatouage de maillages 3D peuvent aussi être classifiées suivant la robustesse de la marque. On distingue entre méthodes *fragiles* (Molaei *et al.*, 2013), méthodes de *haute capacité* (Bogomjakov *et al.*, 2008) et méthodes *robustes* (Hou *et al.*, 2017). Comme les techniques fragiles, les techniques robustes existantes peuvent être spatiales ou fréquentielles. Les techniques robustes, peuvent être divisées en deux sous domaines, à savoir les techniques fréquentielles basées sur une *analyse fréquentielle directe* et les techniques fréquentielles basées sur *l'analyse multirésolution*.

Difficultés et classification

De nos jours, il existe encore peu de techniques de tatouage de maillages 3D, par rapport à la maturité relative du tatouage des images 2D et des vidéos. Cette situation est due généralement à deux difficultés principales. La forme des maillages qui est généralement irrégulière ainsi qu'à la complexité des attaques possibles sur les maillages 3D (Wang *et al.*, 2008a). Dans le tatouage des images 2D, l'image originale est une matrice composée de pixels et chaque pixel a un ordre intrinsèque (l'ordre de parcours suivant les lignes ou les colonnes). L'utilité de cet ordre est de synchroniser les bits de la marque à insérer. En revanche, il n'existe pas un ordre évident pour les maillages 3D. Certains ordres intuitifs comme l'ordre des sommets ou des facettes du maillage restent très vulnérables aux attaques et sont faciles à altérer. De plus, en raison de la nature irrégulière des maillages, nous ne pouvons pas leur appliquer une analyse spectrale efficace comme celle utilisée dans le cas des images 2D (Cox *et al.*, 1997).

1.6.4.1 Techniques fragiles

Les techniques fragiles sont conçues pour faire face aux problèmes liés à l'authentification du contenu (Wang *et al.*, 2008a). Il s'agit d'insérer une marque fragile qui doit être vulnérable à n'importe quelle modification du maillage tatoué. En outre, la méthode fragile doit être capable de localiser la zone d'altération ou même d'identifier les attaques subies. En réalité, les techniques souvent voulues sont dites semi-fragile. Ces dernières sont robustes aux manipulations ordinaires n'ayant pas un impact sur la forme du maillage telles que les transformations de similarité et le réarrangement des sommets et/ou les facettes du maillage. La majorité des méthodes fragiles spatiales utilisent la géométrie pour insérer la marque (Ohbuchi *et al.*, 1997).

— Techniques spatiales modifiant la géométrie :

Yeo et Yeung proposent la première méthode de tatouage fragile dans la littérature (Yeo et Yeung, 1999). L'idée de base de cet algorithme est de chercher une nouvelle position pour chaque sommet où deux fonctions de hachage prédéfinies ont une valeur identique, de manière à rendre tous les sommets valides pour l'authentification. Dans l'extraction, la validité de chaque sommet est examinée et les attaques possibles sur les sommets non valides sont localisées. Pour se faire, un ordre prédéfini est établi pour surmonter le problème de causalité (Wang *et al.*, 2011). Ce problème peut être défini comme étant la modification des primitives de tatouage suite au processus d'insertion des bits de la marque, ce qui affecte la synchronisation de cette dernière et pourra causer une fausse extraction de ses bits.

Lin *et al.* (2005) ont considéré le réarrangement des sommets comme une opération à laquelle un tatouage fragile devrait résister. Par conséquent, ils ont résolu le problème de causalité tout en obtenant l'invariance au réarrangement des sommets en définissant les deux fonctions de hachage uniquement en fonction des coordonnées du sommet à tatouer.

Chou et Tseng (2006) ont résolu le problème de causalité en introduisant le concept d'ajustement de sommet. Dans cet algorithme, l'une des deux fonctions de hachage dépend de barycentre du voisinage des sommets. Le déplacement des sommets tatoués est contrôlé afin d'éviter les distorsions graves.

Wang *et al.* (2008c) ont proposé un schéma de tatouage fragile similaire à celui de Chou et Tseng (2006) dans le but d'éviter le problème de causalité. Pour ce faire, les auteurs ont choisi de rendre les sommets non adjacents les uns aux autres. Néanmoins, cet algorithme est vulnérable aux transformations de similarité.

— Techniques spatiales modifiant la connectivité :

Ohbuchi *et al.* (1997) ont présenté deux algorithmes de tatouage de maillage visible basés sur la modification de la connectivité. Dans le premier algorithme, la densité de la triangulation locale est modifiée pour insérer la marque. Le second algorithme coupe d'abord une bande de facettes triangulaires du maillage, puis le colle au maillage recadré. Dans ces deux méthodes, les tatouages insérés ne sont pas étalés sur tout le maillage. Ce fait, les empêche d'être des marques fragiles en raison de leur faible capacité de localisation des attaques.

Quelques auteurs ont proposé des méthodes fragiles dans le domaine fréquentiel. Cho *et al.* (2004) ont proposé une méthode de tatouage fragile des maillages semi-réguliers basée sur la transformée en ondelettes. Les auteurs appliquent plusieurs décompositions en ondelettes au maillage original dense et considèrent les facettes du maillage grossier comme primitives d'authentification. L'idée de base, similaire à la méthode spatiale de Yeo et Yeung (1999), est de modifier la forme de chaque facette de façon à ce que les valeurs prédéfinies de deux fonctions de hachage seront les mêmes pour cette facette. La méthode est robuste aux transformations affines. En revanche, l'insertion du tatouage est faite dans un niveau grossier réduit considérablement la précision de localisation des attaques.

En somme, la majorité des méthodes fragiles présentées sont capable de bien localiser les attaques. Néanmoins, aucune d'elle n'est invariante à la fois aux transformations de similarité et aux réarrangement des sommets/arêtes.

1.6.4.2 Techniques de haute capacité

L'objectif principal d'une technique de tatouage de haute capacité est de cacher une grande quantité d'information auxiliaire dans le maillage tridimensionnel (Wang *et al.*, 2008a). Dans certains cas, il est préférable que la marque insérée soit invariante à quelques manipulations, comme le réarrangement des sommets

/facettes et les transformations de similarité afin de garantir un minimum de robustesse. En outre, le schéma de tatouage de haute capacité doit être aveugle pour faciliter l'extraction de la marque et élargir son champ d'application.

La plupart des méthodes de tatouage de haute capacité sont des méthodes spatiales qui prennent les coordonnées des sommets comme primitives de tatouage. Cayre et Macq (2003) ont proposé une méthode aveugle de haute capacité pour les maillages triangulaires. La primitive de tatouage est la projection du sommet sur son arête opposée du triangle comme il est montré dans la Figure 1.10. La capacité de la méthode peut atteindre 1 sommet par bit. Le mécanisme de synchronisation repose sur le choix du premier triangle en fonction d'un critère géométrique ainsi qu'un schéma d'étalement géométrique basé sur une clé secrète. Une capacité supérieure à 3 bits par sommet est obtenue en appliquant une procédure d'insertion multi-niveaux (Wang et Cheng, 2005)(Cheng et Wang, 2006). Cette procédure consiste à modifier successivement les positions parallèles, verticales et rotatives d'un sommet par rapport à son arête opposé dans une facette triangulaire. Bogomjakov *et al.* (2008) modifient les ordres des sommets et des facettes du maillage afin d'insérer des marques de haute capacité.

Gao *et al.* (2012) ont proposé une méthode de tatouage de haute capacité de maillages 3D ayant une connectivité arbitraire dans le domaine spatial. La marque est insérée de façon à être de haute capacité et invariante aux transformations affines en modifiant le rapport de longueurs tout en conservant les quadrilatères coplanaires.

En résumé, les méthodes de haute capacité ont l'avantage d'être capable d'insérer une quantité d'information très importante tout en étant invariantes aux manipulations comme les transformations affines. De ce fait, ils constituent un moyen efficace utilisé dans les applications telles que la télé-médecine, et l'authentification.

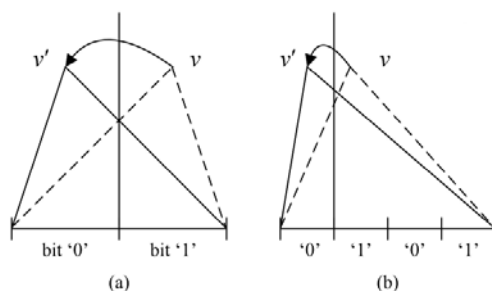


Figure 1.10 – La primitive de tatouage de la méthode de Cayre et Macq (2003), la projection du sommet initial v est déplacée vers le sommet tatoué v' dans l'intervalle le plus proche contenant le bit '0' à insérer : (a) l'arête opposée est divisée en deux intervalles, (b) l'arête opposée est divisée en quatre intervalles.

1.6.4.3 Techniques robustes

La robustesse d'une méthode de tatouage dépend de l'application envisagée. Par exemple, dans une application d'authentification ou de contrôle de copie, une petite quantité d'information insérée est suffisante. En revanche, dans une application d'enrichissement du contenu, la quantité d'information insérée doit être assez importante (Wang *et al.*, 2008a). Dans le cas de la protection des droits d'auteur, le système de tatouage doit assurer une capacité d'environ 64 bits, de façon à pouvoir insérer un identifiant numérique ou un numéro de séquence (Kutter et Petitcolas, 1999). La protection des droits d'auteur nécessite une parfaite extraction du tatouage inséré dans le maillage 3D. Dans les techniques robustes, la marque insérée doit résister aux opérations usuelles ainsi qu'aux attaques malicieuses. Le Tableau 1.1 présente une comparaison entre quelques méthodes robustes de l'état de l'art en termes de capacité et du mode d'extraction de la marque.

1. Techniques robustes dans le domaine spatial :

La majorité des techniques robustes de tatouage de maillages du domaine spatial existantes utilisent la géométrie comme primitive de tatouage. En effet, les méthodes modifiant la connectivité sont fragiles aux attaques de

Tableau 1.1 – Tableau comparatif des techniques robustes de tatouage de maillages en termes de capacité et de type d'extraction.

| Algorithme | Capacité | Mode d'extraction |
|--|----------|-------------------|
| (Benedens, 1999a) | 30 bits | semi-aveugle |
| (Ohbuchi <i>et al.</i> , 2002) | 32 bits | non aveugle |
| (Yu <i>et al.</i> , 2003) | 50 bits | non aveugle |
| (Uccheddu <i>et al.</i> , 2004) | 1 bit | aveugle |
| (Zafeiriou <i>et al.</i> , 2005) | 20 bits | aveugle |
| (Wang <i>et al.</i> , 2008b) | 64 bits | aveugle |
| (Nakazawa <i>et al.</i> , 2010) | 32 bits | aveugle |
| (Zhan <i>et al.</i> , 2014) | 768 bits | aveugle |
| (Rolland-Neviere <i>et al.</i> , 2014) | 64 bits | aveugle |
| (Son <i>et al.</i> , 2017) | 64 bits | aveugle |
| (Medimegh <i>et al.</i> , 2018) | 512 bits | aveugle |

connectivité, ce qui les empêche d'être des schémas robustes et aveugles. L'insertion d'un seul bit par sommet rend la marque insérée très vulnérable aux attaques. Pour remédier à ce problème, certains algorithmes choisissent les positions de plusieurs groupes de sommets comme primitives dans le but d'améliorer la robustesse. Dans ce sens, Yu *et al.* (2003) ont proposé un schéma robuste et non-aveugle. D'abord, les sommets du maillage sont éparpillés et divisés en plusieurs groupes à l'aide d'une clé secrète, puis dans chaque groupe, un bit est inséré en modifiant les longueurs de ces sommets au centre du maillage. Zafeiriou *et al.* (2005) calculent d'abord le centre et les axes principaux du maillage, ensuite convertissent les coordonnées des sommets en coordonnées sphériques du système enregistrées.

De même, Cho *et al.* (2006) construisent l'histogramme des distances entre les sommets et le centre du maillage, puis divisent cet histogramme en cases associées aux différents rangs de cette distance. Un bit est inséré dans chaque bin en modifiant légèrement la moyenne ou la variance de la distribution. La

Figure 1.11 montre le processus d'insertion de la marque en modifiant la moyenne dans la méthode de Cho *et al.* (2006), où l'axe des x indique les distances normalisées entre les sommets et le centre du maillage (norme relative normalisée des sommets), et l'axe des y représente la probabilité d'occurrence. Les deux méthodes de Zafeiriou *et al.* (2005) et Cho *et al.* (2006) basées sur les histogrammes sont aveugles et robustes contre la majorité des types d'attaques. Néanmoins, elles ont un faible niveau de sécurité vu qu'elles sont basées sur la modification d'histogrammes. Les deux méthodes mentionnées auparavant ont des stratégies différentes pour obtenir l'invariance aux transformations de similarité. Dans la méthode de Zafeiriou *et al.* (2005) un enregistrement du maillage aveugle et robuste à l'extraction est effectué pour récupérer la même pose canonique que celle utilisée lors de l'insertion du tatouage. Cho *et al.* (2006) utilisent une primitive invariante, qui est la distribution des distances des sommets au centre du maillage. De nombreux chercheurs ont donc choisi d'utiliser le système de coordonnées sphériques comme primitive d'insertion de tatouage (Ashourian *et al.*, 2004) (Zafeiriou *et al.*, 2005) (Lee et Kwon, 2008) (Bors et Luo, 2012) (Mun *et al.*, 2015).

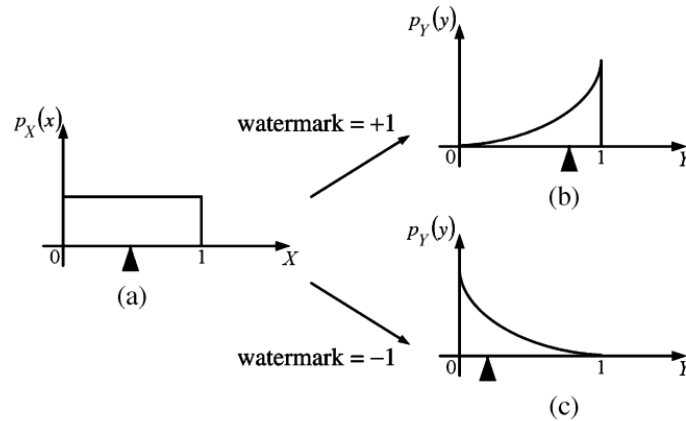


Figure 1.11 – Processus d’insertion de tatouage en modifiant la moyenne dans la méthode de Cho *et al.* (2006) : (a) la distribution uniforme supposée dans un bin ; (b) la valeur moyenne est augmentée pour insérer le bit ’+1’ ; (c) la valeur moyenne est diminuée pour insérer le bit ’-1’.

Les facettes sont aussi des primitives intéressantes de maillage 3D pour incorporer le tatouage. Dans l’algorithme TSQ (Triangle Similarity Quadruple) proposé par Ohbuchi *et al.* (1998), la primitive de tatouage est le rapport entre la hauteur d’un triangle et la longueur de son arête opposée. TSQ est aveugle et invariant aux transformations de similarité. Benedens (1999b) a proposé un algorithme de masquage de données aveugles dans lequel la hauteur de facette triangulaire est quantifiée. Benedens (1999a) a proposé une méthode robuste basée sur "Extended Gaussian Image" (EGI) (Horn, 1984) du maillage. Ce schéma s’avère relativement robuste contre les déformations de la surface. Kwon *et al.* (2003) ont présenté une approche de tatouage de maillage 3D similaire basée sur l’EGI. La marque est insérée par modification de la distribution des vecteurs normaux des facettes. Lee et Kwon (2007) ont adopté l’EGI complexe pour le tatouage de maillages au lieu de l’EGI. Ils effectuent la cartographie de la direction normale des facettes et le regroupement des facettes de la même manière que Benedens (1999b) et Kwon *et al.*

(2003). Les trois algorithmes de Benedens (1999a), Kwon *et al.* (2003) et Lee et Kwon (2007) ont besoin de récupérer la pose du maillage d'origine dans un espace 3D lors de la phase d'extraction, afin d'obtenir un EGI ou EGI complexe invariant, ce qui les rendent semi-aveugles.

Il existe d'autres techniques de tatouage spatial qui modifient la géométrie du maillage. Harte et Bors (2002) et Bors (2006) ont présenté un algorithme aveugle et robuste aux transformations de similarité. La primitive est la position relative d'un sommet par rapport à son voisinage. Une division d'espace à deux états est établie et le sommet est déplacé dans le sous-espace correct en fonction du bit de tatouage à insérer.

Nakazawa *et al.* (2010) ont proposé une méthode de tatouage de maillage 3D basée sur la saillance. La marque est insérée statistiquement comme dans (Cho *et al.*, 2006) dans les régions segmentées en se basant sur la saillance. Zhan *et al.* (2014) ont proposé une technique aveugle de tatouage de maillage 3D basée sur la courbure des sommets. L'erreur quadratique moyenne de la fluctuation de courbure est calculée pour chaque sommet. La marque est insérée en modifiant la fluctuation moyenne des sommets.

Le système proposé dans la méthode de Rolland-Neviere *et al.* (2014) est la généralisation d'un schéma de tatouage de maillage 3D où le processus d'insertion est formulé comme un problème de programmation quadratique afin de minimiser la distorsion. Le système fait de sorte que l'insertion du tatouage n'altère pas le centre de gravité du maillage.

Son *et al.* (2017) ont proposé un algorithme dans le but est de préserver l'imperceptibilité du maillage 3D en se basant sur la saillance. Cette dernière est utilisée afin de diminuer les distorsions causée par l'insertion de la marque. Les bits de la marque sont insérés en utilisant la distribution des normes des sommets en résolvant le problème de minimisation de l'erreur quadratique.

Récemment, Medimegh *et al.* (2018) ont proposé un schéma de tatouage robuste et aveugle basé sur la saillance. Les auteurs extraient les points saillants en utilisant la fonction d'auto-diffusion (Auto Diffusion Function). Ensuite, le maillage est segmenté en différentes régions suivant ses points extraits. Finalement, la marque est insérée statistiquement dans chaque région en modifiant l'amplitude des normes des sommets.

En résumé, le principal inconvénient des techniques de tatouage de maillage robustes dans le domaine spatial est leur robustesse relativement faible face aux attaques de connectivité, à l'exception des techniques basées sur l'histogramme et sur l'EGI. Pour les schémas aveugles, la synchronisation est un problème difficile, car les attaques et le processus d'insertion de la marque lui-même peuvent désynchroniser le processus de l'extraction. Cependant, l'avantage de ces méthodes réside dans le fait qu'elles ont une capacité élevée et sont faciles à mettre en œuvre. En outre, nous pouvons constater que, pour résister aux attaques de connectivité de manière aveugle, les méthodes spatiales existantes sélectionnent certains types de caractéristiques invariantes à la connectivité en tant que primitives de tatouage. Ces caractéristiques, dans une certaine mesure, capturent la propriété essentielle de la forme du maillage et sont donc plus ou moins préservées après les changements de connectivité. Dans ce contexte, nous proposons dans le chapitre 3 un schéma aveugle et robuste de tatouage de maillages dans le domaine spatial basé sur la saillance en insérant la marque par quantification des normes des sommets du maillage.

2. Techniques robustes dans le domaine fréquentiel :

Les algorithmes de tatouage de maillage aveugles et robustes les plus réussis sont ceux du domaine fréquentiel (Liu *et al.*, 2012). Une meilleure imperceptibilité peut être obtenue grâce à l'effet d'étalement du tatouage intégré

dans toutes les parties spatiales du maillage original et en tirant profit de l'effet de masquage du système visuel humain. Une meilleure robustesse peut être obtenue si le tatouage est inséré dans les basses et moyennes fréquences. Cependant, il n'existe pas encore d'outil d'analyse spectrale suffisamment performant et robuste pour les maillages 3D. Ceci est dû principalement à la nature irrégulière des maillages 3D qui rend difficile l'analyse spectrale. Presque tous les outils d'analyse de fréquence de maillage existants ont leurs limites. Outre les algorithmes insérant le tatouage dans les coefficients spectraux obtenus par analyse fréquentielle directe du maillage original, nous présentons également les algorithmes basés sur l'analyse multirésolution. L'idée de base des deux types de méthodes de tatouage est identique : la marque est insérée par modulation des données obtenues après une certaine transformation de maillage 3D original.

La première classe des algorithmes de tatouage de maillages 3D insère le tatouage en appliquant une analyse fréquentielle directe. Dans l'analyse spectrale laplacienne combinatoire classique de maillages 3D, une matrice laplacienne symétrique D de dimension $NS \times NS$ est construite (NS étant le nombre de sommets de maillage) dépendant uniquement de la connectivité du maillage. Dans la méthode de Ohbuchi *et al.* (2002), une marque non-aveugle est insérée par modulation additive des basses et moyennes fréquences du maillage. L'équation 1.23 décrit le schéma d'insertion additive du coefficient spectral y_k (respectivement x_k et z_k), où $w_k \in \{-1, 1\}$ est le bit de marque à insérer, $a_k \in \{-1, 1\}$ est un bit pseudo-aléatoire généré à l'aide d'une clé secrète et α est la puissance de tatouage.

$$y'_k = y_k + \alpha a_k w_k \quad (1.23)$$

$$q_k = \frac{1}{3} [(x'_k - x_k).a_k + (y'_k - y_k).a_k + (z'_k - z_k).a_k] \quad (1.24)$$

Afin d'extraire un bit de la marque, la valeur moyenne de q_k est d'abord calculé comme donné dans l'équation (1.24), où x'_k, y'_k, z'_k sont les coefficients spectrales du maillage tatoué et éventuellement attaqué. Dans le cas où le maillage tatoué n'est pas attaqué, nous aurons $q_k = \alpha.w_k$. Le bit extrait de la marque est simplement le signe de q_k i.e ($w_k = \text{sign}(q_k)$). Afin de surpasser le problème de complexité de calcul causé par l'analyse spectrale combinatoire, les chercheurs segmentent souvent le maillage original en plusieurs patches, chacun possédant moins de sommets avant l'insertion du tatouage. Ensuite, une analyse spectrale locale, qui nécessite beaucoup moins de calcul, est effectuée sur ces patches. Le problème de la complexité du calcul peut également être résolu en effectuant une dérivation partielle (au lieu d'une dérivation complète) de la solution du problème propre établi. Par exemple, dans (Ohbuchi *et al.*, 2002), les auteurs ne déduisent qu'un nombre limité de paires de valeurs propres basses fréquences et de vecteurs propres en utilisant la méthode de Golub (1996). Ces valeurs propres et vecteurs propres calculés seront utilisés ultérieurement lors de l'insertion ou l'extraction de la marque. Un autre problème est que les bases d'analyse spectrale dépendent entièrement de l'information de connectivité du maillage et donc des coefficients spectraux obtenus. Ces coefficients constituent souvent les primitives de tatouage et ne sont pas robustes contre les attaques de connectivité. Afin de surmonter cette fragilité, avant d'extraire la marque, il est nécessaire d'effectuer une étape de pré-traitement afin de récupérer exactement la même connectivité que celle du maillage original. En raison de ces deux problèmes, la plupart des schémas de tatouage de maillages robustes existants basés sur l'analyse spectrale laplacienne combinatoire ne sont pas aveugles, telles que

les techniques de Ohbuchi *et al.* (2002), et Lavoue *et al.* (2007). Les schémas aveugles dans le domaine spectral des maillages 3D ont été exploités pour la première fois par Cayre *et al.* (2003). Leur système d'insertion de la marque est substitutif. Comme montré dans la Figure 1.12, la valeur médiane de l'ensemble $\{x_k, y_k, z_k\}$ est remplacée en fonction du bit à insérer et des intervalles de quantification établis par les valeurs maximales et minimales du même ensemble. Dans cet exemple, le bit à insérer est 1, donc la valeur médiane est déplacée de l'intervalle supérieur vers l'intervalle inférieur. Leur schéma de tatouage est aveugle. Cependant, afin de garantir une robustesse satisfaisante, notamment contre les attaques de connectivité, il est nécessaire de se disposer du maillage original dans la phase d'extraction. Les méthodes de Luo et Bors (2008) et Liu *et al.* (2008), sont très robustes, notamment contre les attaques de connectivité. Dans la méthode de Luo et Bors (2008), la robustesse dépend de la stabilité de la distribution d'un groupe de coefficients de hautes fréquences obtenu après une analyse spectrale combinatoire Laplacienne. Cette méthode nécessite le calcul de tout le spectre du maillage original, ainsi, elle n'est pas applicable pour les maillages larges ayant plus de 10000 sommets. Liu *et al.* (2008) ont amélioré ce point en introduisant un prétraitement robuste et aveugle d'enregistrement et de segmentation avant les phases d'insertion et d'extraction de la marque. Le maillage original et le maillage tatoué (éventuellement attaqué) sont divisés de manière robuste et cohérente en plusieurs patchs sur lesquelles l'analyse spectrale nécessite beaucoup moins de calcul. Ensuite, dans chaque intervalle de basse fréquence, un bit est inséré en modifiant la relation relative entre une certaine amplitude spectrale sélectionnée et la moyenne des autres amplitudes spectrales du même intervalle, de manière similaire à celle de Cayre *et al.* (2003). A l'instar du problème de causalité, l'inconvénient majeur du schéma de Liu

et al. (2008), est sa faible capacité de 5 bits. Certains outils d'analyse spectral directe des maillages ont été utilisés pour le tatouage robuste. Wu et Kobbelt (2005) ont rapporté une méthode spectrale basée sur les fonctions de base radiales. Murotani et Sugihara (2003) ont proposé d'intégrer le tatouage en utilisant l'analyse spectrale singulière. Dans les deux méthodes, les bases d'analyse spectrale dépendent entièrement des informations de géométrie du maillage.

En résumé, bien que les outils d'analyse spectrale des maillages 3D actuels n'assure pas une robustesse assez satisfaisante, ils offrent un domaine prometteur dans lequel l'idée de base des méthodes de tatouage fréquentielles des images existantes pourraient être appliquées.

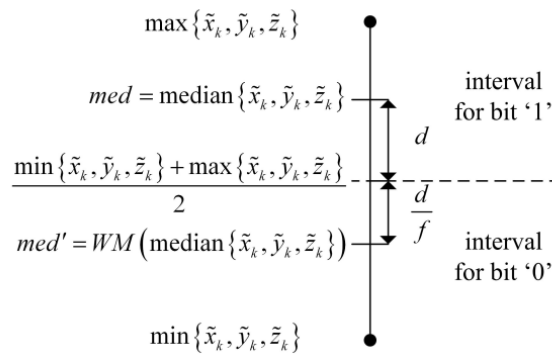


Figure 1.12 – Processus d'insertion de Cayre *et al.* (2003).

3. Techniques robustes basées sur l'analyse multirésolution

L'analyse multirésolution des maillages 3D est un outil très performant utilisé pour assurer un compromis acceptable entre la complexité du maillage et la capacité de traitement et de stockage de ce dernier (Dodgson *et al.*, 2006). Une telle analyse produit un maillage grossier qui représente la forme de base (basses fréquences) du modèle 3D et un ensemble d'informations de détails à différents niveaux de résolution représentant les moyennes et hautes fré-

quences. Au cours de la phase de synthèse, nous pouvons obtenir une série de maillages reconstruits, représentant le même objet 3D de base, mais avec des complexités différentes, sur plusieurs niveaux de résolutions. L'avantage le plus intéressant de l'analyse multirésolution pour le tatouage réside dans sa flexibilité. En effet, il existe différents emplacements (niveaux de résolutions) d'insertion susceptibles de la marque suivant l'application envisagée. Par exemple, l'insertion du tatouage fragile est généralement faite dans un niveau de résolution de détails afin d'assurer l'authentification du maillage 3D, tandis que l'insertion du tatouage dans un niveau grossier, assurant à la fois une bonne robustesse et imperceptibilité, est dédiée à l'application de protection des droits d'auteur. Le calcul des ondelettes est un outil courant qui sert à effectuer une analyse multirésolution pour les maillages 3D. La formulation mathématique de l'analyse en ondelettes et de la synthèse des maillages 3D a été introduite par Lounsbery *et al.* (1997). La Figure 1.13 illustre le mécanisme de décomposition en ondelettes pour les maillages triangulaires semi-réguliers. Pour appliquer une analyse en ondelettes, le maillage doit être semi-régulier. À chaque étape d'itération de décomposition, un groupe de quatre triangles est fusionné en un seul triangle et trois des six sommets initiaux V_2 , V_4 , V_6 sont conservés dans le niveau de résolution inférieur. Les coefficients d'ondelettes sont des vecteurs 3D, calculés comme les erreurs de prédiction des sommets supprimés (sommets impairs, V_1 , V_3 , V_5 dans la Figure 1.13) associé à chaque arête du maillage. La prédiction utilisée est la prédiction intuitive, qui est le point médian des deux sommets pairs ayant été incidents par rapport au sommet impair. Une telle analyse peut être appliquée de manière itérative sur un maillage dense avec une connectivité semi-régulière, et l'algorithme de synthèse peut effectuer la reconstruction inverse. La Figure 1.14 illustre la décomposition en ondelettes du maillage

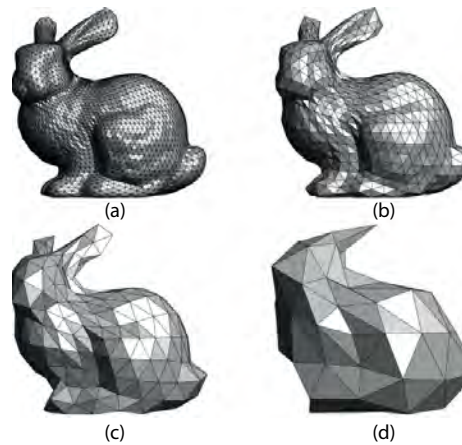


Figure 1.14 – Décomposition en ondelettes du maillage semi-régulier Bunny : (a) Maillage dense , (b) après une seule décomposition, (c) après deux décompositions, (d) représentation grossière du maillage Bunny.

Bunny.

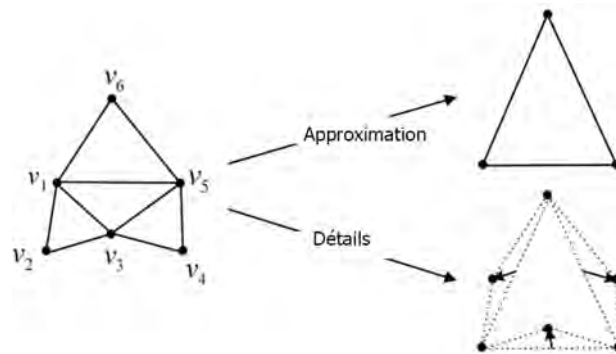


Figure 1.13 – Illustration du processus de décomposition en ondelettes pour les maillages semi-réguliers.

Kanai *et al.* (1998) ont proposé un algorithme de tatouage non aveugle qui modifie le rapport entre une norme de coefficient d'ondelette et la longueur de son arête associée, robuste aux transformations de similarité. Ucheddu *et al.* (2004) ont décrit un algorithme de tatouage aveugle des maillages semi-réguliers basé sur la corrélation. Dans leur méthode, le maillage semi-régulier

original est d'abord normalisé en une pose spatiale canonique, puis le signal de tatouage est inséré par modulation additive des normes des coefficients d'ondelettes à un certain niveau de résolution. Dans le chapitre 4, nous présenterons une méthode de tatouage aveugle et robuste pour les maillages semi-réguliers également basée sur la transformation en ondelettes. A noter que pour appliquer une analyse en ondelettes, les maillages doivent avoir une forme régulière ou semi-régulière. Or, avec une étape de remaillage avant la décomposition en ondelettes, l'analyse en ondelettes peut être étendue aux maillages irréguliers (Alliez *et al.*, 2008). Jian-qiu *et al.* (2004) ont proposé une technique insérant un tatouage non aveugle à la fois dans la représentation la plus grossière ainsi que dans les coefficients d'ondelettes sphériques du maillage irrégulier. En revanche, cette étape de remaillage ne semble pas assez robuste et peut également introduire un bruit important dans le maillage 3D. Il en découle que la robustesse et l'imperceptibilité de la marque peuvent être dégradées du fait de ce prétraitement de remaillage. En utilisant un outil d'analyse directe d'ondelettes de maillages irréguliers proposé par Valette et Prost (2004), sans aucune étape de remaillage, Kim *et al.* (2005) ont mis au point un algorithme aveugle. L'inconvénient de la méthode est qu'elle représente une fragilité aux attaques de connectivité.

Wang *et al.* (2008b) ont proposé un tatouage hiérarchique de maillages semi-réguliers. Trois marques aveugles ont été insérées dans le maillage original en modifiant les normes des coefficients d'ondelettes pour différentes applications. La première marque (robuste) est insérée afin de protéger les droits d'auteurs. La deuxième marque (de haute capacité) est insérée pour l'application de l'enrichissement du contenu. Quant à la troisième marque (fragile), elle est insérée pour assurer l'authentification du maillage 3D tatoué. Les trois tatouages sont insérés dans différents niveaux de résolution après avoir

appliqué une analyse multirésolution. le tatouage robuste est inséré en modifiant les normes des vecteurs de coefficients d'ondelettes associés au niveau de résolution le plus grossier ; le tatouage fragile est inséré au niveau de haute résolution obtenu juste après une décomposition en ondelettes en modifiant les orientations et les normes des vecteurs de coefficients d'ondelettes ; le tatouage de haute capacité est inséré dans un ou plusieurs niveaux intermédiaires en considérant des groupes de normes de vecteurs de coefficients d'ondelettes comme primitives de tatouage.

En conclusion, les schémas d'analyse multirésolution de maillages actuels présentent soit des restrictions de connectivité, soit des vulnérabilité de robustesse, notamment aux attaques de connectivité. Pour la majorité des techniques de tatouage numériques du domaine multirésolution, l'enregistrement et le ré-échantillonnage sont nécessaires pour assurer une robustesse satisfaisante. Cependant, ces traitements supplémentaires les rendent inévitablement des techniques non-aveugles. Or, l'utilisation des caractéristiques géométriques de maillages assurant une bonne qualité perceptuelle combinées avec les avantages de la transformation en ondelettes, invariants aux attaques géométriques et non géométriques, pourraient constituer une bonne primitive de tatouage. Dans ce contexte, nous allons présenter dans le chapitre 4 notre proposition de tatouage de maillage 3D basée sur l'analyse multirésolution combiné avec la saillance de maillage pour la protection des droits d'auteur.

1.7 Conclusion

Le tatouage numérique, appliqué aux images 2D et aux maillages 3D, est considéré comme une solution performante pour protéger les droits d'auteur "*Copyright protection*" de ces contenus multimédia. Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de base du tatouage d'images 2D et d'objets 3D en mettant la lumière sur

ses contraintes et ses applications. Nous y avons présenté aussi les attaques possibles et les métriques utilisées. Nous avons également effectué une classification des méthodes de tatouage de l'état de l'art existantes. Dans le prochain chapitre, nous allons détailler notre première contribution qui consiste à proposer une méthode de tatouage d'images 2D robuste et aveugle dans le domaine hybride (DFT-DCT).

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons notre première contribution de tatouage d'images 2D. Nous décrivons en détails le contexte et la motivation de notre contribution dans la section 2.2. Ensuite, nous décrivons le schéma proposé, à savoir l'insertion et l'extraction du tatouage dans la section 2.3. La méthode proposée est une technique de tatouage aveugle et robuste des images dans le domaine hybride basé sur la DFT et la DCT pour protéger les droits d'auteur. La sécurité du schéma proposé est renforcée à l'aide de la transformation d'Arnold décrite dans la sous section 2.3. Nous discutons par la suite les résultats expérimentaux afin d'évaluer les performances en termes de robustesse et d'imperceptibilité dans la section 2.4.

2.2 Contexte et motivation

La majorité des schémas de tatouage existants sont basés sur une seule transformation et ils tentent d'insérer le tatouage dans des valeurs sélectionnées afin d'accroître la robustesse et l'imperceptibilité Cox *et al.* (2007). Par conséquent, la nécessité de développer des méthodes hybrides combinant deux ou plusieurs transformations pour tirer profit des caractéristiques de ces dernières et atteindre les

objectifs requis a considérablement augmenté (Singh *et al.*, 2017a). La principale limitation des schémas de tatouage d'images existants pour la protection des droits d'auteur réside dans la difficulté d'assurer un bon compromis entre imperceptibilité et robustesse. Pour surpasser cette limitation, nous avons proposé une nouvelle combinaison de la transformée de Fourier discrète (DFT) et de la transformée en cosinus discrète (DCT) pour concevoir une méthode de tatouage d'images robuste et aveugle. La raison de ce choix est dû au fait que le module de la DFT montre une capacité à garantir une imperceptibilité élevée, tandis que la DCT peut améliorer la robustesse de la technique proposée, notamment contre les attaques de traitement de signal communes. En outre, la transformation d'Arnold est utilisée pour renforcer la sécurité du système de tatouage proposé.

2.3 Méthode proposée

Dans ce travail, nous proposons une méthode de tatouage robuste et aveugle pour la protection des droits d'auteur. Le tatouage est inséré dans la bande moyenne de la DCT du module de la DFT. Le choix du module de la DFT a été motivé par le gain d'imperceptibilité. Néanmoins, le schéma montre une faible robustesse lorsque le module de la DFT est utilisé uniquement. Partant du fait que la DCT est très robuste contre les attaques de traitement du signal, nous estimons qu'il s'agit d'une solution à envisager dans notre schéma. Pour cette raison, la DCT est appliquée au module de la DFT pour améliorer la robustesse du tatouage. De plus, la marque est cryptée avec la transformation d'Arnold afin d'accroître la sécurité du système proposé.

Transformation d'Arnold

L'idée derrière la mise en place des algorithmes de cryptage est d'améliorer la sécurité du tatouage afin d'empêcher toute personne non autorisée de le modifier ou de le supprimer. Par conséquent, il garantit plus de sécurité et de fiabilité pour l'image dans le processus de transmission. Le cryptage d'Arnold est largement utilisé dans le tatouage d'images numérique en raison de sa simplicité et de sa périodicité Min *et al.* (2013). En utilisant la périodicité, l'image cryptée peut être facilement décryptée après plusieurs cycles. De plus, les relations spatiales entre les pixels sont détruites, ce qui assure plus de sécurité. Par conséquent, sans l'algorithme de cryptage et de la clé secrète, l'attaquant ne peut pas déchiffrer le tatouage, même si un pirate est arrivé à l'extraire de l'image tatouée. La période de transformation d'Arnold devrait être inférieure à $\frac{N^2}{2}$ avec $N \times N$ la taille de l'image Dyson et Falk (1992).

Les paramètres de transformation d'Arnold sont considérés comme clé supplémentaire pour améliorer la sécurité du schéma proposé. La transformation d'Arnold, est définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \text{mod}(n) \quad (2.1)$$

où (a, b) et (a', b') sont les coordonnées des pixels de la marque originale et la marque cryptée respectivement. Soit A la matrice à gauche dans la partie droite de l'équation (2.1), $I(a, b)$ et $I(a', b')^{(n)}$ représentent les pixels de la marque originale et celle cryptée obtenue après avoir appliqué la transformation d'Arnold n fois,

respectivement. Ainsi, le cryptage de la marque peut être écrit comme suit :

$$I(a', b')^{(p)} = AI(a, b)^{(p-1)} \text{mod}(n) \quad (2.2)$$

où $p = 1, 2, \dots, n$, et $I(a', b')^{(0)} = I(a, b)$. Pour obtenir $I(a, b)^{(p-1)}$ on multiplie la matrice inverse de A à chaque côté de l'équation (2.2). C'est-à-dire, en calculant de manière itérative la formule (2.3) n fois, la marque peut être décryptée.

$$J(a, b)^{(p)} = A^{-1}J(a', b')^{(p-1)} \text{mod}(n) \quad (2.3)$$

où $J(a', b')^{(0)}$ est la représentation en pixels de la marque cryptée et $J(a, b)^{(p)}$ la représentation en pixels décryptée après p itérations. La Figure 2.1 montre un

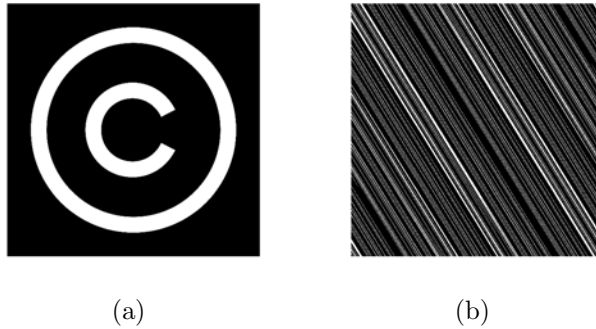


Figure 2.1 – (a) Marque originale, (b) Marque cryptée.

exemple de cryptage de marque se basant sur la transformation d'Arnold, où (a) est la marque originale de taille 64×64 , et (b) est la marque cryptée avec $n = 50$.

Insertion du tatouage

Le mécanisme d'insertion proposé est illustré dans la Figure 2.2. Tout d'abord, un pré-traitement est appliqué à la marque. Il s'agit de la transformation d'Arnold

qui est utilisée pour chiffrer le tatouage afin d'accroître la sécurité du schéma proposé. L'idée de base de cette transformation est de rendre difficile, voire impossible, l'extraction du tatouage sans connaître l'algorithme de cryptage et ses paramètres qui représentent une clé secrète supplémentaire (clé 2). Initialement, la DFT est appliquée à l'image originale, puis son module $M(u, v)$ et sa phase $\phi(u, v)$ sont calculés à l'aide des équations 2.4 et 2.5. Ensuite, la matrice du module est divisée en blocs carrés de taille 8×8 . Après, la DCT est calculée sur chaque bloc du module. Finalement, en utilisant la première clé secrète, deux séquences pseudo-aléatoires non corrélées sont générées : une séquence pour les bits "0" (PN_Seq_0) et une autre séquence pour les bits "1" (PN_Seq_1). Les séquences PN ont la même taille que les coefficients de la bande moyenne.

$$M(u, v) = |F(u, v)| = [R^2(x, y) + I^2(x, y)]^{1/2} \quad (2.4)$$

$$\phi(u, v) = \tan^{-1} \left[\frac{I(u, v)}{R(u, v)} \right] \quad (2.5)$$

où $F(u, v)$ et $\phi(u, v)$ sont le module et la phase de la transformée de Fourier respectivement.

Le processus d'insertion consiste en l'insertion des séquences PN en fonction de la valeur de bit de la marque à insérer en utilisant l'équation 2.6. $M(u, v)$ est obtenu après avoir appliqué la DCT au module de la DFT. La marque $W(u, v)$ qui consiste en deux séquences pseudo-aléatoires générées par une clé secrète, est insérée dans les coefficients de la bande moyenne. F_M représente la bande de fréquence moyenne modifiée lors de l'insertion du tatouage. La puissance d'insertion est ajustée par le paramètre k qui contrôle le compromis entre robustesse et imperceptibilité. Les coefficients de la bande moyenne de la transformation DCT du module de la DFT

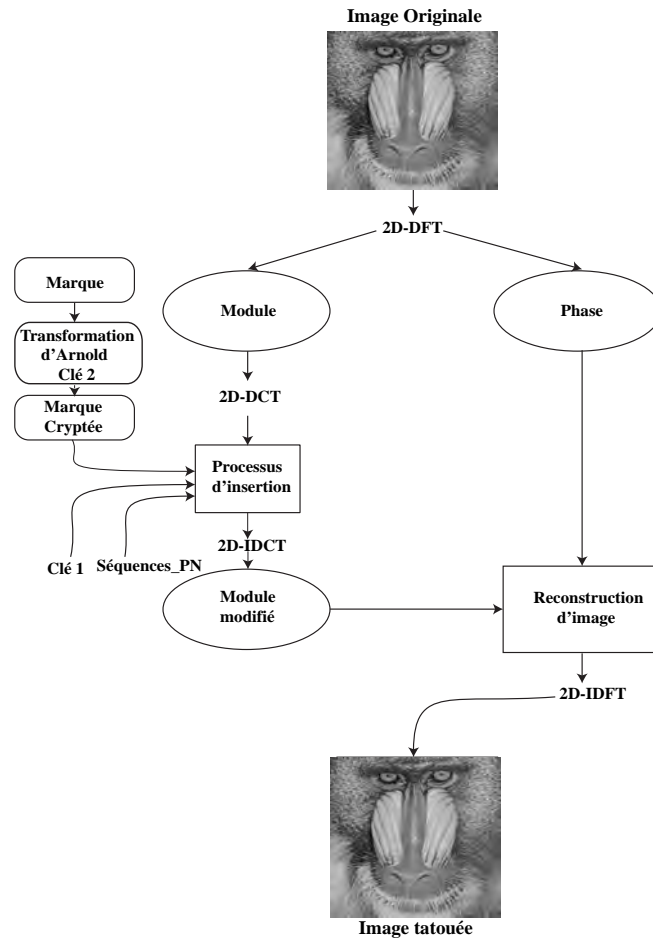


Figure 2.2 – Schéma d’insertion de tatouage de la méthode proposée.

sont utilisés pour l’insertion de la marque afin d’éviter de modifier les parties visuelles importantes de l’image. Le module de DFT original et celui modifié sont illustrés dans la Figure 2.3. D’après cette Figure ne pouvons constater qu’il n’y a pas une différence visible entre le module original et le module modifié.

$$M_w(u, v) = \begin{cases} M(u, v) + k * W(u, v) & u, v \in F_M \\ M(u, v) & u, v \notin F_M \end{cases} \quad (2.6)$$

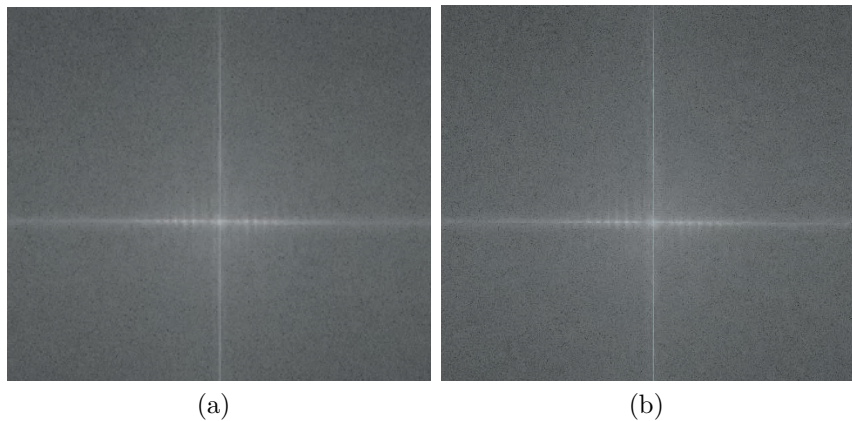


Figure 2.3 – (a) Module DFT original (b) Module DFT modifié de l’image Mandrill avec ($k = 9600$).

Le tatouage est constitué de deux séquences pseudo-aléatoires PN_Seq_0 et PN_Seq_1 (voir Algorithme 2.1). Chaque séquence est un vecteur composé de valeurs $\{-1, 1\}$ avec une distribution normale ayant une moyenne nulle et une variance unitaire. La motivation derrière ce choix (tatouage ayant une distribution normale) est la robustesse face aux attaques qui tentent de produire une image non tatouée en faisant la moyenne de plusieurs copies tatouées de manière différente Press *et al.* (1989). Du côté de la détection, il est important que les séquences PN soient statistiquement indépendantes. Cette contrainte est accordée par la nature pseudo-aléatoire des séquences. De plus, de telles séquences pourraient être facilement régénérées en fournissant la bonne clé (clé 1).

La puissance du tatouage est ajustée par le facteur de gain k . En fait, une augmentation de ce facteur augmente la robustesse du tatouage mais réduit en contrepartie son imperceptibilité. Ainsi, nous choisissons empiriquement la valeur de k de manière à avoir un bon compromis entre robustesse et imperceptibilité. Ensuite, la DCT inverse est appliquée pour obtenir le module modifié. Enfin, l’image tatouée est reconstruite avec la phase inchangée et le module modifié à l’aide de

l'équation (2.7).

$$I_w(u, v) = M_w(u, v) * e^{(j\phi(u,v))} \quad (2.7)$$

Ensuite, la transformée de Fourier discrète inverse (IDFT) est effectuée pour obtenir l'image tatouée. La Figure 2.2 illustre le processus d'insertion du tatouage décrit en détail dans l'algorithme 2.1.

Algorithme 2.1 Insertion de la marque

1. Appliquer la transformation d'Arnold à l'image marque en utilisant la clé secrète (Clé 2).
 2. Appliquer la DFT à l'image originale et calculer le module et la phase.
 3. Générer deux séquences PN non corrélées pour les coefficients de la bande de fréquence moyenne en utilisant la clé secrète (Clé 1).
 4. Diviser le module de la DFT en blocs 8×8 et puis appliquer la DCT.
 5. Insérer les deux séquences PN en fonctions des bits de la marque à insérer en utilisant l'équation (2.6)
 - Si** Watermark (bit) = 0 **alors** $W(u, v) = \text{PN_Seq}_0$
sinon $W(u, v) = \text{PN_Seq}_1$.
 6. Appliquer la DCT inverse (IDCT) à chaque bloc de module tatoué.
 7. Reconstruire l'image tatouée à partir du module modifié en utilisant l'équation (2.7).
 8. L'image tatouée finale est obtenue après avoir appliqué la DFT inverse (IDFT).
-

Extraction du tatouage

Avec la connaissance de la clé secrète (Clé 1) utilisée lors du processus d'insertion et de la Clé 2 utilisée lors du pré-traitement de cryptage de la marque, le processus d'extraction est relativement simple, comme le montre la Figure 2.4. Ainsi, la méthode proposée est aveugle car seules deux clés privées (clé 1 et clé 2) sont nécessaires. Il suffit d'appliquer la 2D-DFT sur l'image tatouée et de calculer le module de la DFT. Avec la même clé secrète (clé 1) utilisée dans la phase

Algorithme 2.2 Extraction de la marque

1. Appliquer la DFT à l'image tatouée et calculer son module.
2. Générer deux séquences pseudo-aléatoires (PN_Seq_0 et PN_Seq_1) à l'aide de la même clé secrète (Clé 1) utilisée dans la phase d'insertion.
3. Appliquer la DCT au module de la DFT et en extraire les coefficients des fréquences de la bande moyenne.
4. Calculer la corrélation entre les coefficients des fréquences moyennes F_M et les deux séquences PN.
5. Extraire le $i^{\text{ème}}$ bit de la marque W_i comme suit :

$$W_i = \begin{cases} 0 & \text{si } Corr(0) > Corr(1) \\ 1 & \text{si } Corr(1) > Corr(0) \end{cases} \quad (2.8)$$

où $Corr(0)$ est la corrélation entre les coefficients des fréquences de la bande moyenne du $i^{\text{ème}}$ bloc et la séquence PN_Seq_0 , et $Corr(1)$ est la corrélation entre les coefficients des fréquences de la bande moyenne du $i^{\text{ème}}$ bloc et la séquence PN_Seq_1 .

6. Appliquer la transformée d'Arnold inverse afin d'extraire l'image marque.

d'insertion, deux séquences PN sont générées. De ce fait, nous obtenons les mêmes séquences PN. Ensuite, la DCT est appliquée au module de la DFT. Dans le processus d'extraction, comme indiqué sur la Figure 2.4, les coefficients des moyennes fréquences de chaque bloc DCT 8×8 sont extraits. Ensuite, pour chaque bloc, les corrélations entre les coefficients de moyennes fréquence et les deux séquences PN sont calculées. Ensuite, le $i^{\text{ème}}$ bit chiffré de la marque est extrait à l'aide de l'équation (2.8). Enfin, à l'aide de la clé 2, la transformation d'Arnold inverse est appliquée pour extraire la marque en clair. Le schéma d'extraction proposé est décrit en détail dans l'algorithme 2.2.

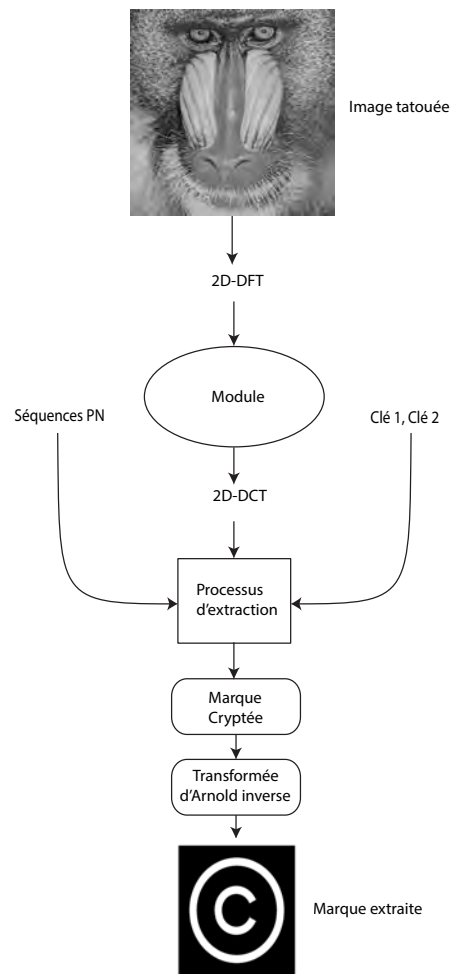


Figure 2.4 – Schéma d'extraction de tatouage de la méthode proposée.

2.4 Résultats expérimentaux

Pour évaluer les performances du schéma de tatouage proposé, plusieurs expérimentations ont été menées sur 10 images naturelles en niveaux de gris à 8 bits, d'une taille de 512×512 , comme illustré sur la Figure 2.9(a-f), et un ensemble de 39 images texturées fournies par l'Université de Californie du Sud Weber (1997). La majorité de ces images proviennent de la base de données Brodatz Brodatz

(1966). La Figure 2.10(a-j) montre un échantillon de 6 images texturées de test extraites de Brodatz (1966). Un logo binaire (19×52) est utilisé en tant que marque, comme indiqué dans la Figure 2.13(a). Un autre logo binaire de taille 64×64 est utilisé à des fins de comparaison, comme indiqué dans la Figure 2.1. Pour renforcer la sécurité de notre système, l'image marque est cryptée à l'aide de la transformée d'Arnold. La valeur du paramètre de la transformation d'Arnold, qui représente la deuxième clé secrète (clé 2), est fixée à $n = 24$, où n désigne le cycle de cryptage d'Arnold. Le paramètre k , qui indique la puissance de la marque insérée, est choisi de manière à garantir le meilleur compromis entre imperceptibilité et robustesse. Pour ce faire, plusieurs expérimentations ont été conduites empiriquement en utilisant plusieurs valeurs de k pour déterminer la valeur assurant ce compromis. Selon ces expériences, la meilleure valeur trouvée, avant et après attaques, est $k = 9600$ (voir Figure 2.5 et Figure 2.6).

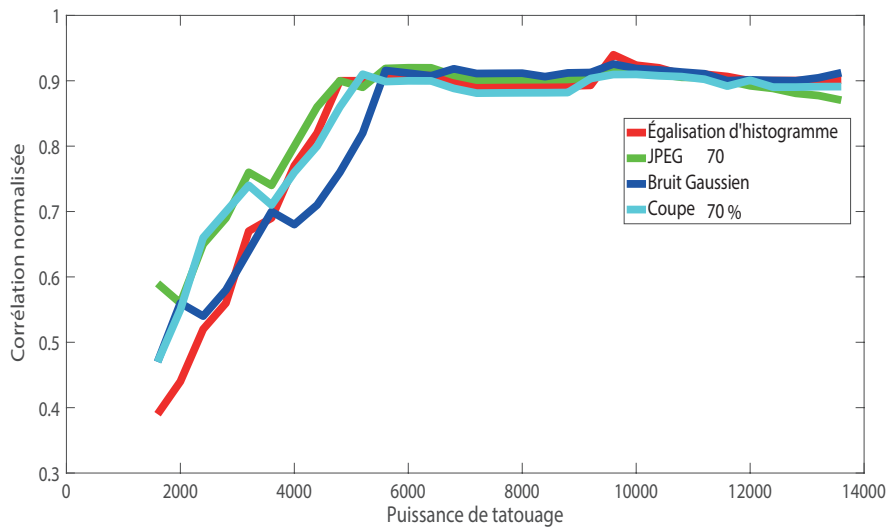


Figure 2.5 – Les valeurs de corrélation lors de la variation des puissances de tatouage après avoir appliqué quelques attaques sur Lena.

D'après les Figures 2.5 et 2.6, on peut remarquer qu'au delà de cette valeur, les performances en termes de corrélation normalisée et PSNR sont dégradées. Toutes

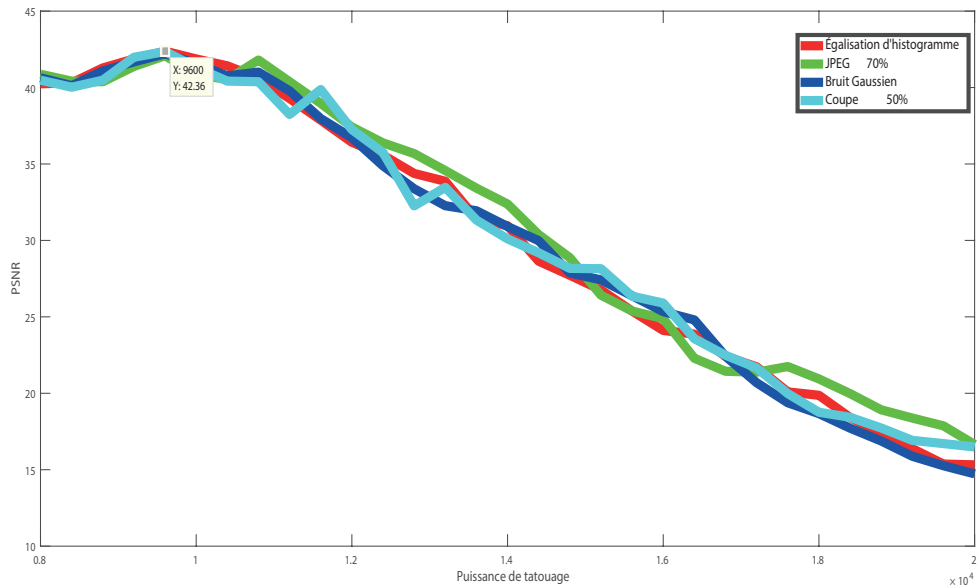


Figure 2.6 – Les valeurs de PSNR obtenues en fonction des puissances de tatouage après avoir appliqué quelques attaques sur Lena.

les expérimentations ont été implémentées en utilisant MATLAB R2013a sur un PC doté d'un processeur Intel Core i5-3470 à 3.2 GHz avec 4 Go de RAM.

2.4.1 Évaluation de l'imperceptibilité

Afin d'évaluer l'imperceptibilité du schéma proposé, nous calculons le PSNR et le SSIM entre l'image originale et l'image tatouée, respectivement. Ces deux métriques ont été décrites en détails dans la sous-section (1.5.2). De plus, la différence absolue entre les images tatouées et les images originales a été calculée pour mesurer à quel point elles se ressemblent. La Figure 2.7 montre un exemple calculant la différence absolue correspondant aux images "Mandrill" et "D94".

Le Tableau 2.2 illustre les résultats d'imperceptibilité en termes de PSNR et SSIM en utilisant un logo de taille (19 × 52) en tant que marque. La Figure 2.9 et le

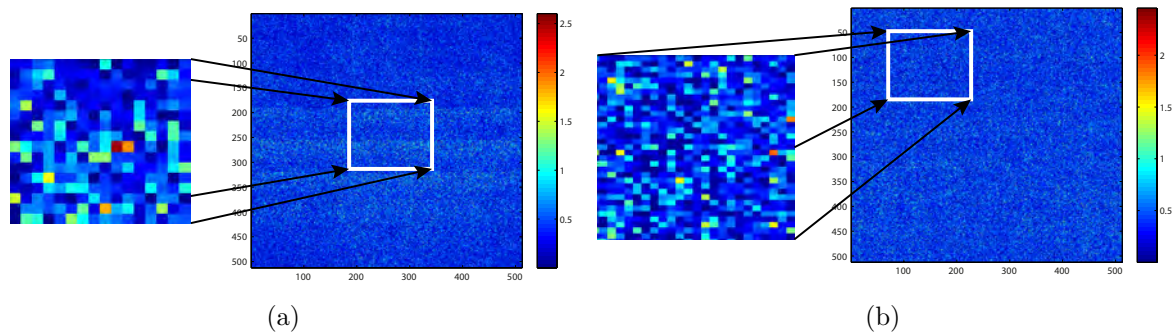


Figure 2.7 – Différence absolue entre l'image originale et l'image tatouée : (a) Mandrill, (b) D94.

Tableau 2.2 montrent que les images tatouées conservent une bonne qualité et qu'il n'y a presque pas de différence entre les images originales et les images tatouées. De plus, toutes les valeurs de PSNR obtenues sont supérieures à 57 dB et les valeurs de SSIM sont proches de 1. Par ailleurs, la valeur moyenne du PSNR des images naturelles dépasse légèrement la moyenne du PSNR des images texturées. Ces résultats montrent que la méthode proposée est insensible à la nature de l'image. Mais dans les deux cas, les valeurs du PSNR reflètent la bonne imperceptibilité du schéma proposé. La différence entre les images tatouées et les images originales, illustrée dans la Figure 2.7, indique que les parties modifiées sont réparties sur toute l'image. Cela est dû au fait que la marque est insérée dans tous les coefficients de la bande moyenne de la DCT. Les Figures 2.7 et 2.9 permettent de conclure que toutes les valeurs obtenues après le calcul de la différence entre les images originales et les images tatouées sont proches de 0. De plus, comme le montre la Figure 2.3, il n'y a pas de différence visuelle entre le module original et celui modifié après intégration de tatouage. Nous avons également comparé l'histogramme des images originales et tatouées pour vérifier s'il existe un indice quelconque indiquant que l'image a été tatouée. En effet, dans certaines techniques de tatouage numérique, la distribution de l'image tatouée est déséquilibrée, indiquant la présence de la

marque.

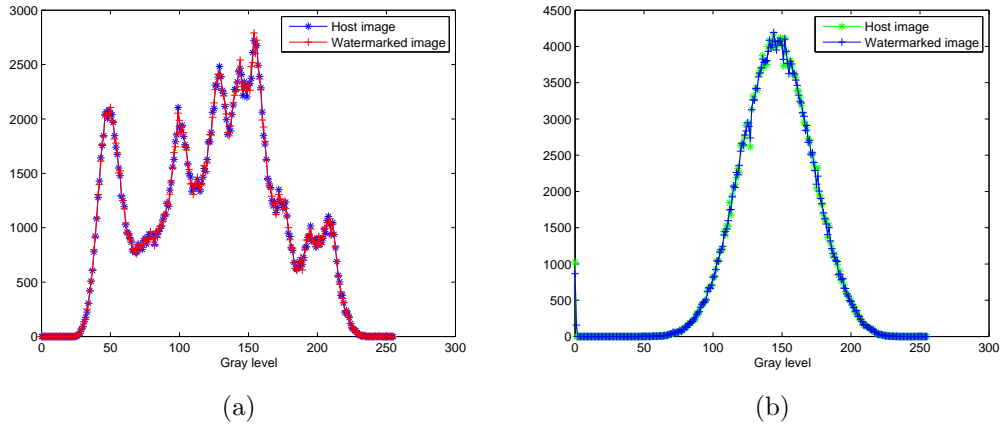


Figure 2.8 – (a) : Histogramme illustrant l'imperceptibilité de l'image Lena, (b) : Histogramme illustrant l'imperceptibilité de l'image D19 prise de Brodatz.

Deux résultats typiques correspondant aux images "Lena" et "D19" sont illustrés dans la Figure 2.8. Nous pouvons observer sur cette Figure la grande similitude entre la forme des histogrammes de l'image originale et celle de l'image tatouée.

Afin de quantifier l'impact de l'utilisation de deux transformations dans le schéma proposé, nous comparons les performances en termes de PSNR et de SSIM entre l'approche basée sur DFT-DCT avec l'approche basée sur la DFT seulement. Le Tableau 2.1 montre que la combinaison des deux transformations DFT-DCT donne de meilleurs résultats en termes d'imperceptibilité que l'approche basée sur la DFT seule pour toutes les images de test.

2.4.2 Évaluation de la robustesse

Afin d'évaluer la robustesse du schéma proposé, nous calculons la corrélation normalisée (NC) (voir la sous-section 1.5.2) entre la marque originale et la marque extraite. Avant d'appliquer les attaques, on peut constater que la marque a été

Tableau 2.1 – Comparaison d'imperceptibilité entre l'algorithme basé sur la DFT uniquement et l'algorithme proposé basé sur la combinaison DFT-DCT pour plusieurs images de test.

| Image originale | Méthode de tatouage | | | |
|-----------------|-----------------------------|--------|---------|--------|
| | DFT | | DFT-DCT | |
| | Métrique d'imperceptibilité | | | |
| | PSNR | SSIM | PSNR | SSIM |
| Mandrill | 45.58 | 0.9871 | 61.28 | 1.0 |
| Lena | 47.31 | 0.9785 | 61.97 | 0.9998 |
| Peppers | 48.21 | 0.9745 | 65.97 | 1.0 |
| Cameraman | 46.15 | 0.9803 | 63.54 | 0.9999 |
| Goldhill | 49.73 | 0.9762 | 66.37 | 0.9999 |
| Walkbridge | 41.02 | 0.9778 | 59.24 | 0.9999 |
| Woman_blonde | 39.87 | 0.9812 | 57.31 | 0.9998 |
| Livingroom | 43.66 | 0.9788 | 59.37 | 0.9999 |
| Pirate | 44.81 | 0.9801 | 58.82 | 0.9999 |
| Lake | 44.05 | 0.9796 | 58.67 | 1.0 |
| Moyenne | 45.039 | 0.9794 | 61.25 | 0.9991 |
| D9 | 44.37 | 0.9692 | 58.97 | 1.0 |
| D12 | 44.63 | 0.9655 | 58.11 | 1.0 |
| D94 | 44.58 | 0.9745 | 58.26 | 0.9999 |
| D15 | 44.66 | 0.9758 | 58.18 | 1.0 |
| D24 | 43.92 | 0.9678 | 57.95 | 1.0 |
| D29 | 43.98 | 0.9754 | 58.03 | 1.0 |
| D38 | 43.45 | 0.9620 | 57.00 | 0.9998 |
| D84 | 44.01 | 0.9685 | 57.96 | 1.0 |
| D19 | 44.85 | 0.9588 | 58.38 | 0.9999 |
| D112 | 45.02 | 0.9734 | 58.41 | 1.0 |
| Moyenne | 44.347 | 0.9691 | 58.125 | 0.9996 |

parfaitement extraite avec une corrélation $NC=1$. Pour tester la robustesse de l'algorithme, les images tatouées ont été exposées à diverses attaques : 1) Ajout de bruit : bruit gaussien (GN) et bruit sel et poivre (SPN) ; 2) attaque de compression de format : compression JPEG et JPEG2000 ; 3) attaque de traitement d'image : filtrage passe-bas gaussien (LPGF), lissage gaussien (GS) et égalisation d'histogramme (HE) ; 4) distorsion géométrique : coupe (Cropp) et rotation. 5) Attaques

Tableau 2.2 – Imperceptibilité du tatouage mesurée en termes de PSNR (dB) et SSIM.

| Images naturelles | PSNR | SSIM | Images texturées | PSNR | SSIM |
|-------------------|-------|---------|------------------|-------|---------|
| Mandrill | 61.28 | 1.0 | D9 | 58.97 | 1.0 |
| Lena | 61.97 | 0.9998 | D12 | 58.11 | 1.0 |
| Peppers | 65.97 | 1.0 | D94 | 58.26 | 0.9999 |
| Cameraman | 63.54 | 0.9999 | D15 | 58.18 | 1.0 |
| Goldhill | 66.37 | 0.9999 | D24 | 57.95 | 1.0 |
| Walkbridge | 59.24 | 0.9999 | D29 | 58.03 | 1.0 |
| Woman_blonde | 57.31 | 0.9998 | D38 | 57.00 | 0.9998 |
| Livingroom | 59.37 | 0.9999 | D84 | 57.96 | 1.0 |
| Pirate | 58.82 | 0.9999 | D19 | 58.38 | 0.9999 |
| Lake | 58.67 | 1.0 | D112 | 58.41 | 1.0 |
| Moyenne | 61.25 | 0.99991 | Moyenne | 58.12 | 0.99996 |

combinées : égalisation de l’histogramme et bruit gaussien (HE + GN), égalisation de l’histogramme et bruit sel et poivre (HE + SPN), bruit gaussien et JPEG (GN + JPEG), bruit sel et poivre et JPEG (SPN + JPEG), filtrage passe-bas gaussien et bruit sel et poivre (LPGF + SPN).

La Figure 2.12 représente les valeurs NC obtenues après une série d’attaques appliquées à une série d’images texturées extraites de la base de donnée Brodatz Brodatz (1966). Nous pouvons conclure du Tableau 2.3 et de la Figure 2.12 que le schéma proposé est très robuste à l’égalisation d’histogramme, quelle que soit la nature de l’image (naturelle ou texturée). La Figure 2.13 affiche les marques extraites après plusieurs attaques (égalisation d’histogramme, bruit sel et poivre, compression JPEG, lissage gaussien, coupe, etc.). Nous pouvons voir visuellement que, bien que les images tatouées soient exposées à ces attaques, la marque est extraite parfaitement.

Afin de montrer davantage la robustesse de notre approche, nous comparons ses performances en termes de corrélation (NC) avec la méthode basée sur la DFT

Tableau 2.3 – Valeurs SSIM et NC après plusieurs attaques appliquées à l'image D9 extraite de la base de donnée (Brodatz, 1966).

| Attaques | SSIM | NC |
|--|--------|--------|
| Égalisation d'histogramme | 0.9995 | 1.0 |
| Bruit gaussien ($\mu = 0$, $\sigma = 0.005$) | 0.9928 | 0.9947 |
| Bruit sel et poivre ($\mu = 0$, $\sigma = 0.001$) | 0.9997 | 1.0 |
| Filtrage gaussien passe-bas | | |
| ($\sigma = 0.5, 3 \times 3$) | 0.9999 | 1.0 |
| ($\sigma = 0.5, 9 \times 9$) | 0.9998 | 1.0 |
| ($\sigma = 0.6, 3 \times 3$) | 0.9998 | 1.0 |
| ($\sigma = 0.6, 9 \times 9$) | 0.9996 | 0.9984 |
| Lissage gaussien | | |
| ($\sigma = 0.5, 3 \times 3$) | 1.0 | 1.0 |
| ($\sigma = 0.5, 9 \times 9$) | 0.9999 | 0.9999 |
| ($\sigma = 0.6, 3 \times 3$) | 0.9996 | 0.9954 |
| ($\sigma = 0.6, 9 \times 9$) | 0.9995 | 0.9802 |
| Compression JPEG | | |
| 90% | 0.9997 | 1.0 |
| 50% | 0.9871 | 0.9874 |
| 30% | 0.9341 | 0.9344 |
| 10% | 0.6740 | 0.6743 |
| Compression JPEG2000 | | |
| CR=4 | 0.9997 | 1.0 |
| CR=8 | 0.9460 | 0.9463 |
| CR=10 | 0.9002 | 0.9003 |
| Coupe | | |
| 25% | 1.0 | 1.0 |
| 50% | 1.0 | 1.0 |
| Attaques combinées | | |
| HE + GN ($\sigma = 0.001$) | 0.9995 | 1.0 |
| HE + GN ($\sigma = 0.01$) | 0.9995 | 0.9882 |
| HE + SPN ($\sigma = 0.01$) | 0.9995 | 0.9796 |
| GN ($\sigma = 0.001$) + JPEG (90%) | 0.9995 | 1.0 |
| GN ($\sigma = 0.001$) + JPEG (70%) | 0.9994 | 0.9704 |
| SPN ($\sigma = 0.001$) + JPEG (90%) | 0.9997 | 1.0 |
| SPN ($\sigma = 0.001$) + JPEG (70%) | 0.9996 | 0.9946 |
| LPGF ($\sigma = 0.5, (9 \times 9)$) + SPN ($\sigma = 0.001$) | 0.9996 | 0.9947 |
| LPGF ($\sigma = 0.6, (9 \times 9)$) + SPN ($\sigma = 0.001$) | 0.9994 | 0.9694 |

seule après avoir appliqué différents types d'attaques. Le Tableau 2.4 indique que l'approche DFT-DCT a considérablement amélioré les performances de robustesse par rapport à la méthode de tatouage qui se repose sur la DFT seule. La Figure 2.11 montre l'image tatouée de Mandrill attaquée par différents types d'attaques.



Figure 2.9 – Images originales : (a) Mandril, (b) Peppers, (c) Cameraman, (d) Lena, (e) Goldhill, (f) Walkbridge, (g) Womanblonde, (h) Livingroom, (i) Pirate, (j) Lake, (k) Mandril tatouée. Images tatouées correspondantes : (l-t).

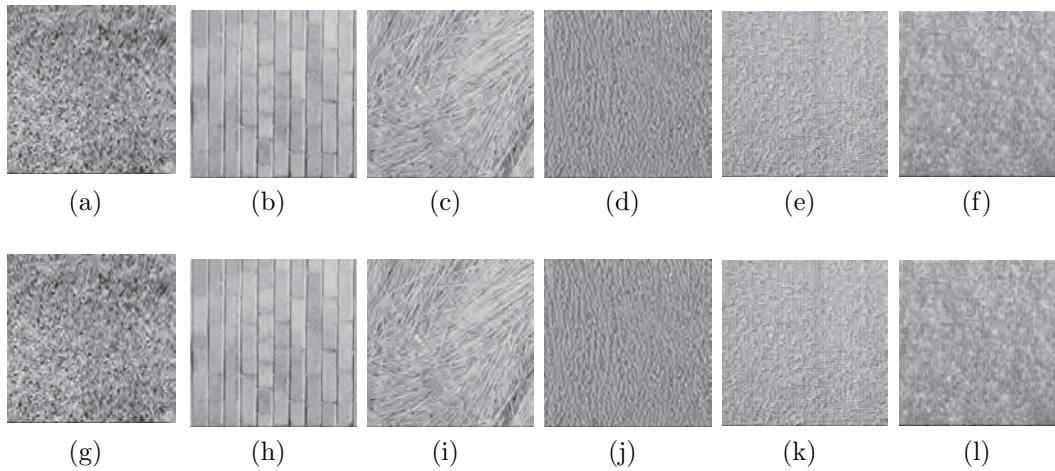


Figure 2.10 – Échantillon d’images texturées originales : (a) D9, (b) D94, (c) D15, (d) D24, (e) D84, (f) D19. Image texturées tatouées correspondantes : (g-l).

2.4.2.1 Ajout de bruit

Nous avons d’abord effectué l’ajout de bruit gaussien avec une moyenne nulle ($\mu = 0$) et plusieurs valeurs de variance (GN1 : $\sigma = 0.001$, GN2 : $\sigma = 0.005$, $\sigma = 0.01$, $\sigma = 0.02$ et $\sigma = 0.1$) afin de mieux comprendre les limites de la méthode proposée. Comme indiqué dans la Figure 2.12 et le Tableau 2.5, on peut constater que pour les valeurs de variance inférieures à 0.02 la méthode est très robuste à l’ajout de bruit. Pour des valeurs de variance plus élevées, les valeurs NC diminuent légèrement, mais les résultats sont toujours bons ($\sigma = 0.1$, NC = 0.9417). Ensuite, le bruit sel et poivre est aussi appliqué aux images tatouées avec une moyenne nulle ($\mu = 0$) et plusieurs intensités ($\sigma = 0.001$, $\sigma = 0.005$, $\sigma = 0.01$ et $\sigma = 0.02$) dans le but d’analyser les limitations du schéma proposé. La Figure 2.12 et le Tableau 2.5 montrent que la méthode proposée peut résister au bruit sel et poivre pour des valeurs d’intensité inférieures à 0.02. Pour une valeur d’intensité égale à 0.02, les résultats sont encourageants (NC= 0,9843).

Tableau 2.4 – Comparaison de la robustesse en termes de corrélation entre l'algorithme basé sur la DFT seule et l'algorithme basé sur la DFT-DCT pour l'image Mandrill.

| Attaques | Méthode de tatouage | |
|---|------------------------|---------|
| | DFT seulement | DFT-DCT |
| | Métrique de robustesse | |
| | NC | NC |
| Sans attaque | 1.0 | 1.0 |
| GN ($\mu = 0, \sigma = 0.001$) | 0.7140 | 1.0 |
| SPN ($\mu = 0, \sigma = 0.001$) | 0.7365 | 0.9947 |
| JPEG (90%) | 0.6854 | 1.0 |
| JPEG (50%) | 0.5102 | 0.9788 |
| JPEG (30%) | 0.4690 | 0.9261 |
| JPEG (10%) | 0.3268 | 0.6433 |
| JPEG2000 (CR= 4) | 0.6134 | 1.0 |
| JPEG2000 (CR= 8) | 0.5846 | 0.9532 |
| JPEG2000 (CR= 10) | 0.5243 | 0.9118 |
| LPGF ($\sigma = 0.5, 5 \times 5$) | 0.7369 | 1.0 |
| LPGF ($\sigma = 0.5, 9 \times 9$) | 0.7087 | 0.9999 |
| GS ($\sigma = 0.5, 3 \times 3$) | 0.7750 | 1.0 |
| GS ($\sigma = 0.5, 9 \times 9$) | 0.7003 | 1.0 |
| HE | 0.9720 | 1.0 |
| Coupe (20%) | 0.9932 | 1.0 |
| Coupe (50%) | 0.9689 | 0.9999 |
| Rotation ($\theta = 0.25^\circ$) | 1.0 | 1.0 |
| Rotation ($\theta = 0.75^\circ$) | 1.0 | 0.9999 |
| Rotation ($\theta = -0.75^\circ$) | 1.0 | 0.9998 |
| HE+GN ($\sigma = 0.001$) | 0.7387 | 1.0 |
| HE+SPN ($\sigma = 0.001$) | 0.7407 | 1.0 |
| GN ($\sigma = 0.001$)+JPEG (90%) | 0.6084 | 1.0 |
| SPN ($\sigma = 0.001$)+JPEG(90%) | 0.5435 | 1.0 |
| LPGF (9×9)+SPN($\sigma = 0.001$) | 0.5108 | 0.9999 |

2.4.2.2 Compression JPEG et JPEG2000

La robustesse contre la compression avec perte est d'une importance cruciale en raison de la large diffusion des outils de compression avec perte et de l'utilisa-

Tableau 2.5 – Valeurs NC après plusieurs attaques appliquées à l'image Mandrill.

| Attaques | Schéma proposé Corrélation normalisée |
|--|--|
| Sans attaque | 1.0 |
| Égalisation d'histogramme | 1.0 |
| Bruit gaussien | |
| ($\mu = 0, \sigma = 0.001$) | 1.0 |
| ($\mu = 0, \sigma = 0.005$) | 1.0 |
| ($\mu = 0, \sigma = 0.01$) | 1.0 |
| ($\mu = 0, \sigma = 0.02$) | 0.9857 |
| ($\mu = 0, \sigma = 0.1$) | 0.9417 |
| Bruit sel et poivre | |
| ($\mu = 0, \sigma = 0.001$) | 1.0 |
| ($\mu = 0, \sigma = 0.02$) | 0.9843 |
| Filtrage gaussien passe-bas | |
| ($\sigma = 0.5, 3 \times 3$) | 1.0 |
| ($\sigma = 0.5, 9 \times 9$) | 0.9999 |
| ($\sigma = 0.6, 3 \times 3$) | 0.9834 |
| ($\sigma = 0.6, 9 \times 9$) | 0.9765 |
| Lissage gaussien | |
| ($\sigma = 0.5, 3 \times 3$) | 1.0 |
| ($\sigma = 0.5, 9 \times 9$) | 1.0 |
| ($\sigma = 0.6, 3 \times 3$) | 0.9903 |
| ($\sigma = 0.6, 9 \times 9$) | 0.9741 |
| Coupe | |
| (25%) | 1.0 |
| (50%) | 0.9999 |
| Attaques combinées | |
| HE + GN ($\mu = 0, \sigma = 0.001$) | 1.0 |
| HE + GN ($\mu = 0, \sigma = 0.01$) | 0.9875 |
| HE + SPN ($\sigma = 0.001$) | 1.0 |
| HE + SPN ($\sigma = 0.01$) | 0.9886 |
| GN ($\mu = 0, \sigma = 0.001$) + JPEG (QF=90) | 1.0 |
| GN ($\mu = 0, \sigma = 0.001$) + JPEG (QF=70) | 0.9715 |
| SPN($\sigma = 0.001$) + JPEG (QF=90) | 1.0 |
| SPN($\sigma = 0.001$) + JPEG (QF=70) | 0.9892 |
| LPGF($\sigma = 0.5, (9 \times 9)$) + SPN ($\sigma = 0.01$) | 0.9999 |
| LPGF ($\sigma = 0.6, (9 \times 9)$) + SPN($\sigma = 0.01$) | 0.9703 |

tion massive de ce format d'image. Pour évaluer les performances de ce point de vue, nous avons appliqué de manière itérative une compression JPEG aux images tatouées, en augmentant à chaque fois le facteur de qualité, i.e en diminuant le taux de compression, allant de 10 à 90. Le facteur de qualité des images est une

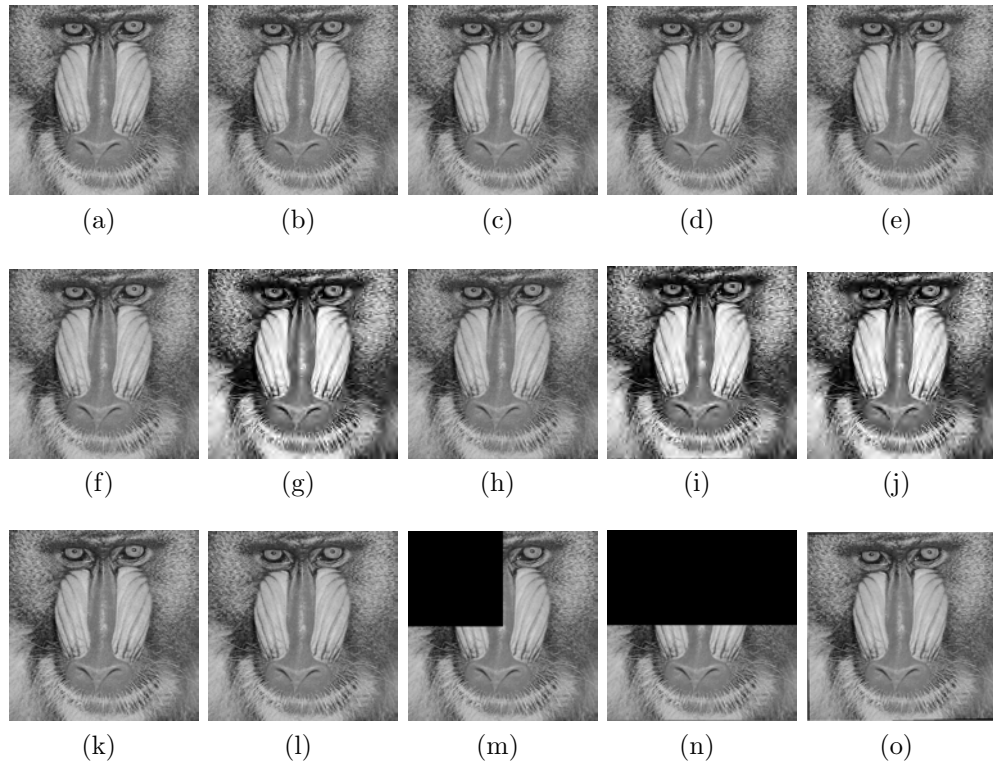


Figure 2.11 – Série d’attaques appliquées à l’image Mandrill tatouée : (a) GN ($\mu = 0$, $\sigma = 0.001$), (b) SPN $\sigma = 0.01$, (c) JPEG 90%, (d) JPEG 60%, (e) LPGF 3×3 , (f) LPGF 9×9 , (g) HE, (h) GS 9×9 , (i) HE + GN $\sigma = 0.001$, (j) HE + SPN $\sigma = 0.01$, (k) GN $\sigma = 0.001$ + JPEG 90, (l) SPN $\sigma = 0.01$ + JPEG 90%, (m) Coupe 25%, (n) Coupe 50%, (o) Rotation 1° .

valeur entière qui varie entre 1 et 99. De plus, la robustesse contre la compression JPEG2000 utilisant différents taux de compression a été étudiée. Le taux de compression (CR) varie entre 1 et 10.

La Figure 2.16 illustre la robustesse de la méthode proposée en termes de corrélation (NC) contre la compression JPEG2000 pour les images naturelles ainsi que les images texturées. On peut conclure de la Figure 2.16 et les Tableaux 2.3 et 2.4 que les valeurs de corrélation sont très proche de 1 quand le taux de compression est inférieur à 5. En augmentant ce taux, les valeurs NC diminuent légèrement mais les

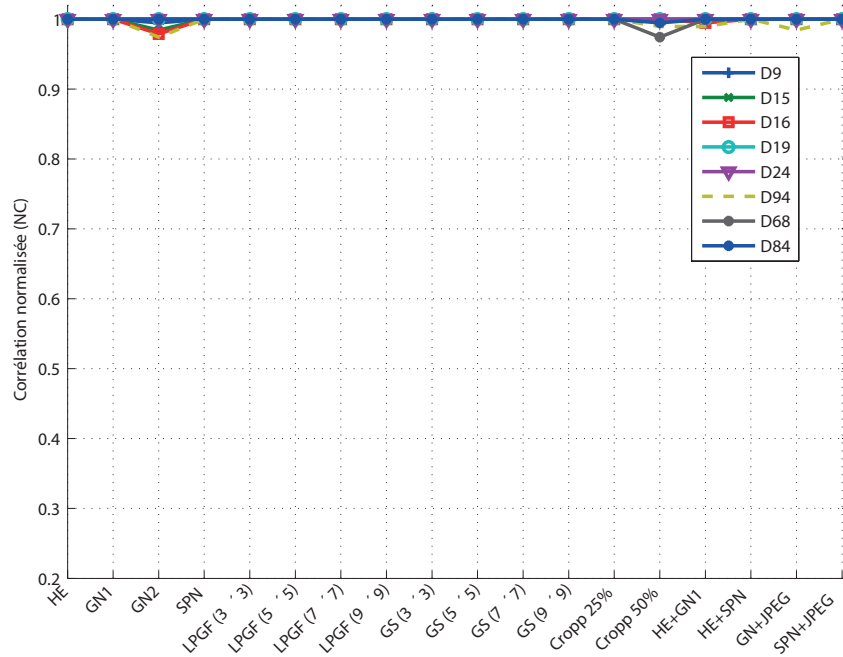


Figure 2.12 – La robustesse en termes de corrélation normalisée (NC) après avoir appliqué plusieurs attaques à une série d’images texturées.

résultats sont toujours encourageants ($NC = 0.9$ quand $CR = 10$). Les Figures 2.14 et 2.15 résument les résultats obtenus en termes de NC après compression JPEG en utilisant différents facteurs de qualité pour un échantillon d’images texturées issues de Brodatz et de cinq images naturelles, respectivement.

La première observation à faire, après avoir examiné les résultats, est qu’il y a une légère différence entre les valeurs NC des images naturelles et celles texturées, même si chaque type d’image a ses caractéristiques spécifiques. Comme montré dans les Tableaux 2.3, et 2.4 la valeur de corrélation est égale à 1 pour toute valeur de facteur de qualité supérieure à 75. Pour les facteurs de qualité inférieures à 75, la valeur NC diminue, mais les résultats prouvent que la technique proposée reste robuste face à la compression JPEG (par exemple, pour un facteur de qualité = 30, $NC = 0.9344$) pour l’image D9 et (pour un facteur de qualité = 30, $NC = 0.9261$)



Figure 2.13 – Marques extraites après quelques attaques : (a) Marque insérée, (b) HE, (c) GN($\sigma = 0.001$), (d) SPN , (e) LPGF (taille de fenêtre : (9×9)), (f) JPEG (Q= 60), (g) JPEG (Q= 65), (h) JPEG (Q= 70), (i) JPEG (Q= 75), (j) Lissage gaussien (taille de fenêtre : (9×9)), (k) Coupe 50%, (l) Coupe 25%, (m) HE+ SPN ($\sigma = 0.001$), (n) GN ($\sigma = 0.001$) + JPEG (QF= 90), (o) SPN ($\sigma = 0.001$) + JPEG (QF= 90), (p) HE + GN ($\sigma = 0.001$).

pour l'image Mandrill. Comme le montre le Tableau 2.4, les résultats obtenus en termes de robustesse contre la compression JPEG basée sur la DCT-DFT dépassent l'approche basée sur la DFT seule.

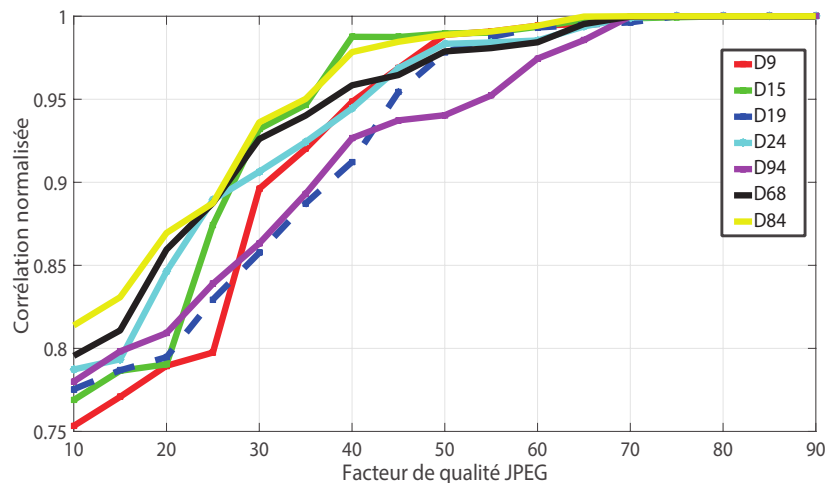


Figure 2.14 – Robustesse en termes de corrélation NC après attaque de compression JPEG appliquée à un ensemble d'images texturées.

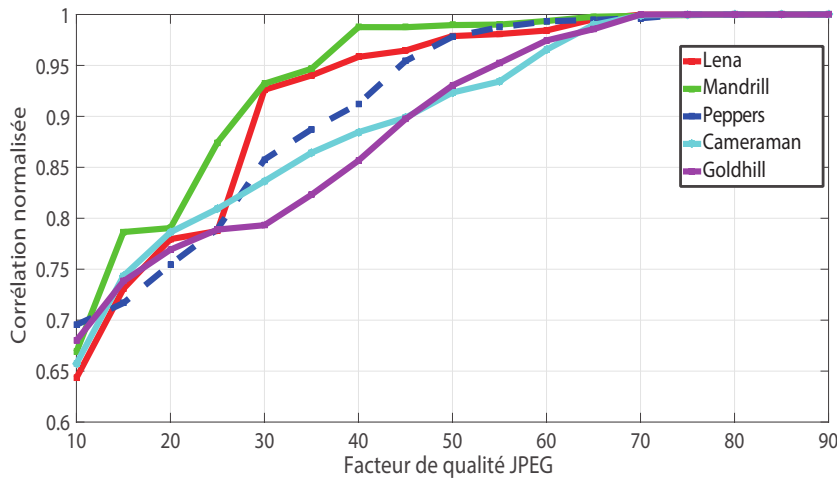
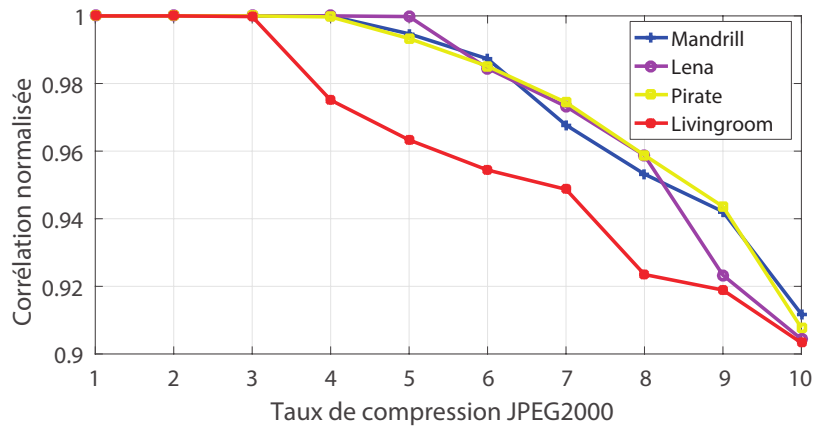


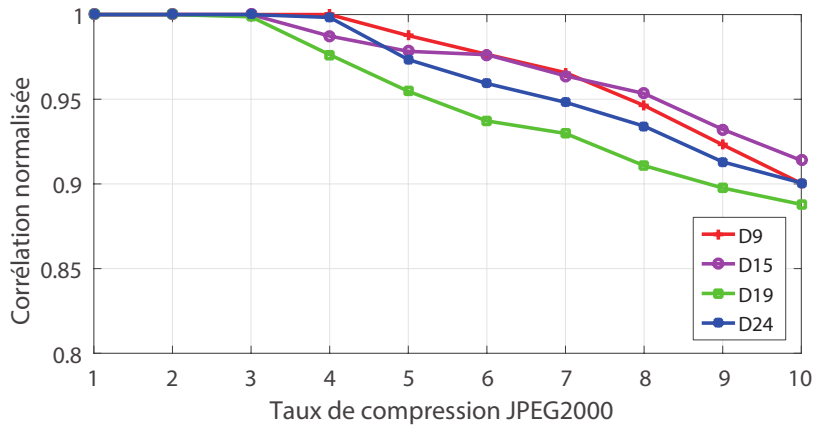
Figure 2.15 – Robustesse en termes de corrélation NC après attaque de compression JPEG appliquée à un ensemble d’images naturelles.

2.4.2.3 Filtrage gaussien passe-bas

L’attaque par filtrage gaussien passe-bas est également l’une des manipulations les plus courantes en traitement d’image. Elle vise à supprimer les composantes de haute fréquence de l’image. Les images tatouées ont été filtrées avec un filtre passe-bas gaussien utilisant plusieurs tailles de fenêtre : (3×3) , (5×5) , (7×7) et (9×9) et deux valeurs de variance ($\sigma = 0.5$, $\sigma = 0.6$). Les résultats affichés dans les Tableaux 2.3 et 2.5 en termes de NC sont obtenus après application de filtrage gaussien passe-bas à l’image naturelle Mandrill et l’image texturée D9. Dans les Tableaux 2.3, et 2.5 Il est clair que notre approche est robuste contre le filtrage gaussien passe-bas et les résultats montrent que la robustesse reste bonne même avec une taille de filtre plus grande. Avec une variance $\sigma = 0.6$ et une taille de fenêtre (9×9) , les valeurs de corrélation obtenues sont 0.9765 et 0.9984 pour les images Mandrill et D9, respectivement.



(a)



(b)

Figure 2.16 – Robustesse en termes de corrélation (NC) après attaque de compression JPEG2000 appliquée à : (a) : une série d'images naturelles ; (b) : une série d'images texturées.

2.4.2.4 Lissage gaussien

Le lissage gaussien est une opération très utilisée en traitement d'image. Elle consiste à supprimer les détails et le bruit de l'image. Nous avons appliqué le lissage gaussien sur toutes les images de test avec différents écarts types et différentes tailles de fenêtre. Nous pouvons remarquer que nous avons obtenu une bonne robustesse contre cette attaque pour différentes tailles de fenêtre ((3 × 3), (5 × 5),

(7×7) and (9×9)) (voir Tableaux 2.3, et 2.5). Les résultats obtenus en termes de corrélation entre la marque extraite et la marque insérée sont très proche de 1. En fait, avec une variance ($\sigma = 0.6$) et une fenêtre de taille (9×9), la corrélation NC=0.9741. En outre, comme illustré dans le Tableau 2.4, la robustesse du système proposé contre le lissage gaussien dépasse le schéma utilisant la DFT seulement.

2.4.2.5 Coupe

La coupe de l'image est considéré comme l'une des manipulations géométriques les plus sévères en traitement d'image. Cette opération consiste à couper une région rectangulaire de l'image en mettant une valeur nulle à ses pixels. Afin de vérifier la robustesse de notre approche contre cette attaque, nous l'appliquons aux images tatouées avec des proportions différentes (10%, 20%, 25%, 40% et 50%). Nous pouvons conclure de la Figure 2.17 que le schéma est robuste à la coupe. Par ailleurs, les Tableaux 2.3 et 2.5 montrent une résistance à cette attaque (NC = 1, 0 pour une proportion de coupe de 50%). La raison principale réside dans le fait que la marque est étalée sur tous les blocs 8×8 du module de la DFT.

2.4.2.6 Attaques combinées

Le but de ces expérimentations est de vérifier à quel point le schéma proposé peut résister aux attaques combinées. Pour tester davantage la robustesse, différentes combinaisons composées de plusieurs types d'attaques ont été réalisées. Les Tableaux 2.3 et 2.5 présentent les valeurs NC où nous pouvons voir la robustesse pour les images texturées et naturelles. Comme illustré par les valeurs de corrélation obtenues supérieures à 0.9694, nous pouvons conclure que nous avons pu assurer une bonne robustesse contre plusieurs types de combinaison d'attaques, indépendamment de la nature de l'image. De plus, d'après le Tableau 2.4, nous

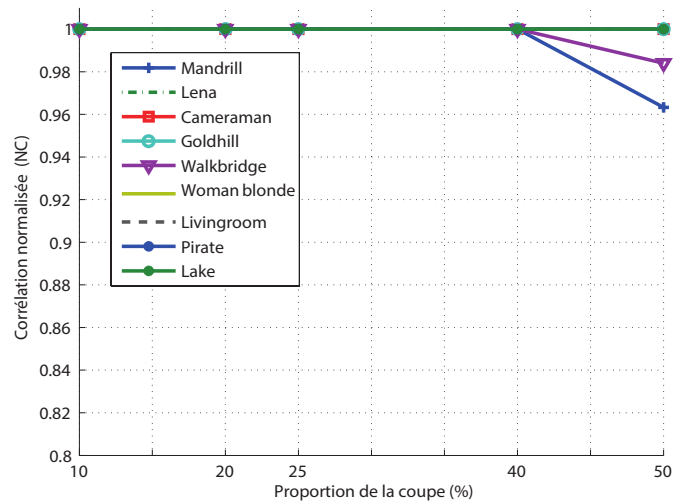


Figure 2.17 – Robustesse en termes de corrélation NC après l’attaque de coupe appliquée à un ensemble d’images naturelles.

remarquons que les résultats obtenus en termes de corrélation de notre travail utilisant le domaine hybride DFT-DCT dépassent les performances si on utilise la DFT seulement.

2.4.3 Complexité

Pour évaluer la complexité de la méthode proposée, nous calculons la complexité de l’algorithme d’insertion et l’algorithme d’extraction en utilisant la notation en grand O . En raison de la multiplication de matrice impliquée dans l’équation 2.7, la complexité de calcul de la méthode proposée est $O(n^3)$. Dans le processus d’extraction, la complexité est $O(n^2)$ en raison du calcul de la transformation d’Arnold inverse. Par conséquent, la complexité globale de la méthode proposée est $O(n^3)$. Dans le but d’analyser la complexité en termes de temps de calcul, nous avons effectué plusieurs expérimentations sur 10 images naturelles de taille 512×512 .

Tableau 2.6 – Temps CPU pour la méthode de tatouage proposée.

| Temps de calcul (secondes) | Méthode proposée |
|----------------------------|------------------|
| Temps d'insertion | 0.9483 |
| Temps d'extraction | 0.8845 |
| Temps total | 1.8328 |

Le Tableau 2.6 illustre la moyenne du temps CPU de l'insertion et l'extraction de la marque. Les expérimentations ont été réalisées dans l'environnement MATLAB sur un PC avec CPU Intel(R) Core(TM) i5-3470 @ 3.2 GHZ avec 4-GB de RAM.

2.4.4 Comparaison avec les méthodes de l'état de l'art

Pour illustrer davantage les performances de ce travail, nous les comparons aux schémas (Wang et Lin, 2004), (Sahraee et Ghofrani, 2013), (Lin *et al.*, 2009), (Singh *et al.*, 2017c), (Singh *et al.*, 2016) et (Singh *et al.*, 2017b) en termes d'imperceptibilité, de robustesse, de capacité et de complexité.

2.4.4.1 Imperceptibilité

Le Tableau 2.7, présente une comparaison d'imperceptibilité entre le schéma proposé et les schémas de Sahraee et Ghofrani (2013), Wang et Lin (2004), Lin *et al.* (2009) et Singh *et al.* (2017c).

Tableau 2.7 – Comparaison d'imperceptibilité et capacité de tatouage pour l'image Lena.

| Schémas de tatouage | PSNR (dB) | Capacité (bits) |
|-------------------------------|--------------|-----------------|
| (Wang et Lin, 2004) | 38.20 | 512 |
| (Sahraee et Ghofrani, 2013) | 51.80 | 512 |
| (Lin <i>et al.</i> , 2009) | 44.73 | 512 |
| (Singh <i>et al.</i> , 2017c) | 41.36 | 16834 |
| Méthode proposée | 61.97 | 988 |

La métrique d'imperceptibilité utilisée dans cette comparaison est le PSNR utilisant Lena comme image de test. Les valeurs de PSNR montre la supériorité de notre méthode sachant que sa capacité dépasse celle des méthodes alternatives. Nous croyons que ceci est obtenu grâce à l'insertion dans le module de la transformée de Fourier discrète, ce qui assure une bonne imperceptibilité.

Tableau 2.8 – Comparaison d'imperceptibilité en termes de PSNR et SSIM entre la méthode proposée et la méthode de Singh *et al.* (2017c) utilisant une marque de taille 256×256 .

| Image | Méthodes de tatouage | | | |
|-----------|-------------------------------|--------|------------------|---------------|
| | (Singh <i>et al.</i> , 2017c) | | Méthode proposée | |
| | Métrique d'imperceptibilité | | | |
| | PSNR | SSIM | PSNR | SSIM |
| Lena | 39.774 | 0.9937 | 40.93 | 0.9972 |
| Cameraman | 39.619 | 0.9868 | 42.03 | 0.9987 |
| Mandrill | 32.492 | 0.9611 | 39.85 | 0.9803 |
| Peppers | 39.031 | 0.9831 | 43.21 | 0.9990 |

Comme illustré dans le Tableau 2.8, nous pouvons déduire les bons résultats obtenus en terme d'imperceptibilité avec une capacité de (65536 bits) qui dépassent les performances de la méthode de Singh *et al.* (2017c).

Tableau 2.9 – Comparaison de robustesse en termes de NC contre l'attaque de bruit sel et poivre avec la méthode de Sahraee et Ghofrani (2013).

| Bruit sel et poivre | Schéma proposé | (Sahraee et Ghofrani, 2013) |
|----------------------------|----------------|-----------------------------|
| $(\mu = 0, \sigma = 0.01)$ | 1.0 | 0.83 |
| $(\mu = 0, \sigma = 0.02)$ | 0.9843 | 0.76 |

2.4.4.2 Robustesse

La comparaison de robustesse est effectuée dans le cas des attaques de bruit gaussien, bruit sel et poivre, égalisation d'histogramme, compression JPEG, coupe et rotation.

Pour l'attaque de bruit sel et poivre, nous pouvons constater qu'en comparaison avec le schéma de Sahraee et Ghofrani (2013), notre proposition est plus robuste (voir Tableau 2.9). Par ailleurs, les Tableaux 2.9, 2.11 et 2.13, montrent que la méthode assure une robustesse supérieure aux méthodes de Lin *et al.* (2009), Sahraee et Ghofrani (2013), Singh *et al.* (2016), Singh *et al.* (2017c) et Singh *et al.* (2017b) pour les attaques de bruit sel et poivre et l'égalisation d'histogramme.

Concernant l'attaque de compression JPEG, nous comparons notre travail avec celui de Wang et Lin (2004), Sahraee et Ghofrani (2013), Lin *et al.* (2009), Singh *et al.* (2017c), Singh *et al.* (2016) et Singh *et al.* (2017b). Nous pouvons remarquer des Tableaux 2.10, 2.11, 2.12, et 2.13. que notre méthode donne des résultats meilleurs que l'approche de Sahraee et Ghofrani (2013), Lin *et al.* (2009) et Wang et Lin (2004). La méthode proposée est robuste à la compression JPEG quand le facteur de qualité est de 50, à l'exception des schémas de Singh *et al.* (2016), Singh *et al.* (2017b) et Singh *et al.* (2017c) dont les performances de robustesse dépassent les notre dans ce cas particulier.

Pour l'attaque de coupe, le Tableau 2.12 montre que notre approche, comparée aux schémas alternatives, donne les meilleures performances en termes de corrélation. En outre, les résultats obtenus après l'attaque de rotation sont encourageantes. Les valeurs de corrélation ne sont pas bonnes lorsque l'angle de rotation est supérieur à $\pm 0.75^\circ$ mais elles dépassent largement les valeurs obtenues pour les méthodes avec lesquelles nous avons comparé (voir Tableau 2.12).

En somme, nous pouvons conclure que non seulement la méthode proposée assure une bonne robustesse à une large gamme d'attaques, mais elle peut aussi résister aux attaques combinées. De plus, elle donne des résultats meilleurs que ceux obtenus pour les méthodes alternatives.

Tableau 2.10 – Les valeurs de corrélation (NC) après compression JPEG avec différents facteurs de qualité.

| Compression JPEG | Schéma proposé | (Sahraee et Ghofrani, 2013) |
|------------------|----------------|-----------------------------|
| (QF=100) | 1.0 | 0.96 |
| (QF=90) | 1.0 | 0.95 |
| (QF=80) | 1.0 | 0.87 |
| (QF=70) | 0.9980 | 0.86 |
| (QF=50) | 0.9384 | 0.79 |
| (QF=20) | 0.7382 | 0.66 |
| (QF=10) | 0.6545 | 0.61 |

Tableau 2.11 – Comparaison de la robustesse de la méthode proposée avec la méthode de Singh *et al.* (2017c) contre quelques attaques appliquées à Lena.

| Attaques | Méthodes de tatouage | |
|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| | Méthode proposée | (Singh <i>et al.</i> , 2017c) |
| Égalisation d'histogramme | 1.0 | 0.9902 |
| Compression JPEG | | |
| QF=50 | 0.9587 | 0.9951 |
| Bruit gaussien | | |
| ($\mu = 0, \sigma = 0.001$) | 0.9972 | 0.9965 |
| Bruit sel et poivre | | |
| ($\mu = 0, \sigma = 0.001$) | 0.9932 | 0.9912 |

2.4.4.3 Complexité

Pour évaluer la complexité de notre approche, une comparaison avec les algorithmes (Singh *et al.*, 2016), (Singh *et al.*, 2017b) et (Singh *et al.*, 2017c) a été élaborée. Ce dernier est basé sur la combinaison NSCT-RDWT-SVD et la transformation d'Arnold quant au schéma Singh *et al.* (2016), il se base sur les transformations DWT, DCT et SVD. Les schémas de Singh *et al.* (2016) et Singh *et al.* (2017c) ont une complexité cubique à cause de l'utilisation de la SVD. La complexité du schéma de Singh *et al.* (2017b) est $O(n^2)$ suite à l'utilisation de la transformée d'Arnold. La complexité du schéma proposé est cubique à cause du produit matriciel effectué lors de la reconstruction de l'image dans la phase d'insertion du tatouage (voir l'équation 2.7). Malgré que la complexité de la méthode

Tableau 2.12 – Comparaison de la robustesse du schéma proposé avec des méthodes alternatives contre plusieurs attaques appliquées à l’image Lena.

| Attaques | Méthodes de tatouage | | | |
|------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | Notre méthode | (Singh <i>et al.</i> , 2017c) | (Sahraee et Ghofrani, 2013) | (Singh <i>et al.</i> , 2017b) |
| HE | 1.0 | NA | 0.83 | 0.79 |
| JPEG | | | | |
| QF=70 | 1.0 | 0.51 | 0.86 | 1.0 |
| QF=90 | 1.0 | 1.0 | 0.95 | 1.0 |
| Coupe | | | | |
| (25%) | 1.0 | – | 0.96 | 0.60 |
| (50%) | 0.9742 | – | 0.90 | – |
| Rotation | | | | |
| $\theta = 0.25^\circ$ | 1.0 | 0.37 | 0.75 | 0.61 |
| $\theta = 0.75^\circ$ | 0.9999 | 0.26 | 0.67 | 0.34 |
| $\theta = 1.0^\circ$ | 0.55 | 0.24 | – | 0.27 |
| $\theta = -0.25^\circ$ | 1.0 | 0.32 | 0.76 | 0.65 |
| $\theta = -0.75^\circ$ | 0.9998 | 0.10 | 0.24 | 0.67 |
| $\theta = -1.0^\circ$ | 0.57 | 0.16 | – | 0.28 |

Tableau 2.13 – Comparaison de la robustesse de l’algorithme proposé avec différentes méthodes contre plusieurs attaques appliquées à Lena.

| Attaques | Méthodes de tatouage | | | |
|--|----------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| | Notre méthode | (Singh <i>et al.</i> , 2017c) | (Singh <i>et al.</i> , 2016) | (Singh <i>et al.</i> , 2017b) |
| Égalisation d’histogramme | 1.0 | 0.9902 | 0.9208 | 0.9942 |
| Compression | | | | |
| JPEG | 0.9384 | 0.9951 | 0.9994 | 0.9935 |
| QF=50 | | | | |
| Bruit gaussien | | | | |
| ($\sigma = 0.01$) | 1.0 | 0.9965 | 0.9754 | 0.9828 |
| ($\sigma = 0.5$) | 0.9803 | 0.9865 | 0.6565 | 0.8481 |
| Bruit sel et poivre ($\sigma = 0.001$) | 0.9997 | 0.9912 | 0.9952 | 0.9867 |

proposée est supérieure à celle du schéma de Singh *et al.* (2017b), l’exactitude de l’extraction de la marque d’une part, et la robustesse aux attaques d’autre part, rend notre méthode plus performante.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode de tatouage d'images robuste et aveugle basée sur les transformations DFT et DCT pour la protection des droits d'auteur. Le tatouage est inséré dans la bande moyenne de la DCT du module de la DFT calculé à partir de l'image originale en utilisant deux clés secrètes afin de renforcer la sécurité du schéma proposé. La première clé est utilisée pour générer les séquences PN qui vont être insérées dans la phase d'insertion. La seconde clé est utilisée pour crypter la marque avec la transformée d'Arnold. Les résultats expérimentaux ont montré que le schéma proposé est très robuste à une large gamme d'attaques pour les images naturelles et texturées, tout en maintenant une bonne imperceptibilité.

La forte utilisation des objets 3D dans différents domaines a rendu nécessaire leur protection. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter notre contribution de tatouage robuste et aveugle de maillages 3D qui a pour but la protection des droits d'auteur.

3.1 Introduction

Les avancées technologiques en informatique ont révolutionné les moyens de communications et de traitement des documents multimédia comme l'image, l'audio, la vidéo et les objets 3D. Suite à la demande récente des modèles 3D dans plusieurs applications telles que l'imagerie médicale, les jeux vidéos, et l'industrie cinématographique, il est devenu nécessaire de mettre en œuvre des systèmes de tatouage 3D visant à protéger les droits d'auteur Zafeiriou *et al.* (2005). La majorité des techniques robustes de tatouage 3D se sont essentiellement focalisées sur la robustesse face aux attaques, alors que leur imperceptibilité reste toujours un problème réel. En outre, peu de méthodes de tatouage des maillages 3D qui utilisent la saillance ont été proposées.

Dans ce chapitre, nous proposons une méthode de tatouage de maillage 3-D robuste et aveugle basée sur la saillance et la quantification par modulation d'index (QIM) (*Quantization Index Modulation*) pour la protection des droits d'auteur. Nous y expliquons la motivation et le contexte de notre contribution. Nous détaillons par la suite le schéma général de la méthode proposée, à savoir l'insertion et l'extraction du tatouage. Finalement, nous décrivons la configuration expérimentale ainsi que les résultats expérimentaux de notre méthode dans le but d'évaluer

ses performances en termes d'imperceptibilité et de robustesse.

3.2 La méthode proposée

Dans cette contribution, nous proposons un système de tatouage de maillages 3D robuste et aveugle pour la protection des droits d'auteur. La marque est insérée en quantifiant les normes des sommets saillants du maillage 3D en utilisant la quantification QIM. La saillance de maillage de (Lee *et al.*, 2005) est utilisée afin de déterminer les sommets candidats pour assurer une bonne imperceptibilité tout en renforçant la robustesse de la marque. Le choix de ces sommets est guidé par le fait que ces primitives sont relativement stables après attaques, notamment les transformations de similarité, l'ajout de bruit, le lissage, la quantification, etc. Dans la Figure 3.1 est illustrée la saillance de l'objet Bimba après lui avoir appliqué plusieurs attaques. On peut conclure de cette Figure que la quasi-totalité des sommets saillants du maillage sont bien détectés même après attaques. Les Figures 3.5 et 3.6 montrent les schémas d'insertion et d'extraction du tatouage du système proposé.

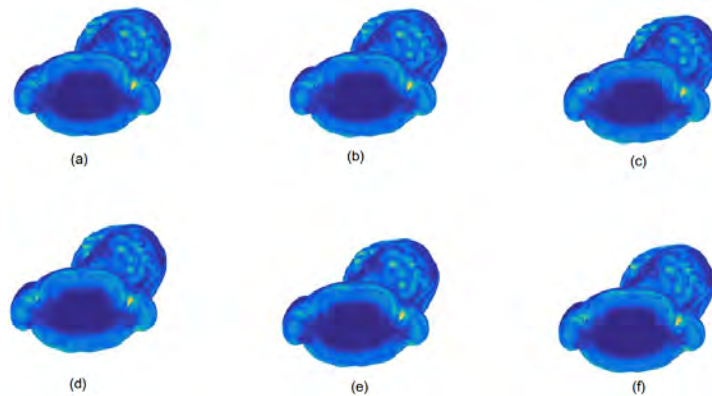


Figure 3.1 – La saillance de l'objet Bimba avant et après attaques : (a) avant attaque, (b) bruit additif 0.3%, (c) transformation de similarité 1, (d) Simplification 10%, (e) Quantification 9 bits, (f) Smoothing $\lambda = 0.1$ (30 iterations).

3.2.1 Saillance de maillage

La saillance des maillages peut être définie comme une mesure qui représente l'importance d'un point ou d'une région locale d'un maillage 3D d'une manière similaire à la perception visuelle humaine Song *et al.* (2014). L'attention visuelle de l'être humain est généralement dirigée vers la partie saillante du maillage 3D. La saillance de maillage utilisée dans le schéma que nous proposons est celle de Lee *et al.* (2005). Cette méthode évalue la saillance de chaque sommet en utilisant la différence de courbure moyenne des surfaces du maillage 3D par rapport à celles des autres sommets du voisinage. La première étape est de calculer la courbure de la surface. Le calcul de la courbure de chaque sommet v est effectué selon la méthode de Taubin Taubin (1995). Soit $Curv(v)$ la courbure moyenne d'un maillage au sommet v . La moyenne pondérée gaussienne de la courbure moyenne peut être exprimée comme suit :

$$G(Curv(v), \sigma) = \frac{\sum_{x \in N(v, 2\sigma)} Curv(x) \exp\left(\frac{-\|x-v\|^2}{2\sigma^2}\right)}{\sum_{x \in N(v, 2\sigma)} \exp\left(\frac{-\|x-v\|^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (3.1)$$

où x est un point du maillage et $N(v, \sigma)$ dénote le voisinage du sommet v constitué d'un groupe de sommets utilisant une distance Euclidienne. σ est l'écart type du filtre gaussien sur une échelle i , $\sigma \in \{2\epsilon, 3\epsilon, 4\epsilon, 5\epsilon, 6\epsilon\}$ et $\epsilon = 0.3\%$ de la diagonale de la boîte englobante du maillage 3D.

$$N(v, \sigma) = \{x \mid \|x - v\| < \sigma\} \quad (3.2)$$

La saillance $S(v)$ d'un sommet v est calculée comme la différence absolue entre les moyennes pondérées gaussiennes calculées à l'échelle fin et à l'échelle grossier du maillage :

$$S(v) = |G(Curv(v), \sigma) - G(Curv(v), 2\sigma)| \quad (3.3)$$

La saillance du maillage multi-échelle d'un sommet v à une échelle i est calculée comme suit :

$$S_i(v) = |G(\text{Curv}(v), \sigma_i) - G(\text{Curv}(v), 2\sigma_i)| \quad (3.4)$$

Après avoir calculer les saillances S_i associées aux différentes échelles i , un opérateur non linéaire de suppression est appliqué dans le but de déterminer uniquement les cartes de saillance comprenant peu de pics de saillance. Ensuite, la saillance S_i est normalisée. La valeur maximale de saillance M_i et la moyenne \bar{m}_i des maxima locaux sont calculées. Par la suite, la saillance S_i est multipliée par le facteur $(M_i - \bar{m}_i)^2$. Finalement, la saillance finale S_f est définie par la somme des saillances sur toutes les échelles ($S_f = \sum_i S_i$).

La Figure 3.2 montre le processus de calcul de la saillance dans l'approche de Lee *et al.* (2005). La Figure 3.3 montre un exemple de saillance de maillages

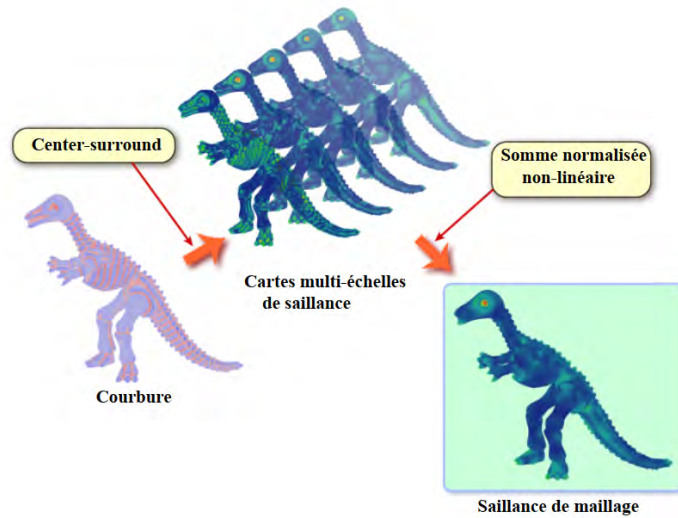


Figure 3.2 – Processus de calcul de la saillance de Lee *et al.* (2005).

utilisant l'approche de Lee *et al.* (2005). Les parties saillantes représentées en jaune et vert sont les parties ayant une forte courbure. Les parties ayant une faible courbure, représentées en bleu, sont considérées non saillantes.

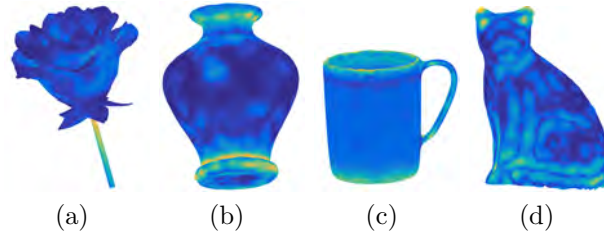


Figure 3.3 – Saillance des maillages 3D utilisant la méthode de Lee *et al.* (2005) : (a) Flower, (b) Vase, (c) Cup, (d) Cat.

3.2.2 Quantification par modulation d'index (QIM)

Les approches de quantification par modulation d'index "Quantization Index Modulation" (QIM) ont été largement utilisées dans le traitement des images, de l'audio et de la vidéo ainsi qu'aux maillages 3D. Pour ces derniers, deux quantificateurs sont nécessaires pour insérer un message binaire dans l'objet 3D Chen et Wornell (2001). Les techniques QIM sont simples à mettre en œuvre, aveugles, et elles garantissent un bon compromis robustesse-capacité. Chaque bit de la marque est associé à un quantificateur dans le signal original. Soit $b \in (0, 1)$ les bits de la marque et x est le signal à quantifier. Les techniques QIM opèrent indépendamment sur ces deux éléments. Pour insérer un bit b , deux quantificateurs Q_0 et Q_1 sont nécessaires Vasic et Vasic (2013). Ils peuvent être définis comme suit :

$$Q_b(x) = \Delta \left[\frac{1}{\Delta} \left(x - (-1)^b \frac{\Delta}{4} \right) + (-1)^b \frac{\Delta}{4} \right] \quad (3.5)$$

où $\lceil \cdot \rceil$ dénote l'opération d'arrondi et Δ est le pas de quantification. Dans le processus d'extraction le signal est re-quantifié en utilisant les mêmes quantificateurs afin d'extraire les bits insérés. Dans la phase d'extraction, les bits de la marque \hat{b} sont retrouvés en recalculant les deux quantificateurs $Q_b(x)$.

$$\hat{b} = \underset{b}{\operatorname{argmin}} \| \hat{x} - Q_b(x) \|_2 \quad (3.6)$$

où $\|\cdot\|_2$ est la norme euclidienne. \hat{x} est le signal quantifié et bruité.

Comme montré dans la Figure 3.4, le signal à quantifier y est remplacé par y' . On suppose que l'on veut insérer un bit '0', le signal à quantifier y est remplacé par la valeur du plus proche o (indiqué par y') dans le quantificateur associé au bit 0. Les régions en o et x représentent les points du quantificateur correspondant au bit 0 et bit 1, respectivement.

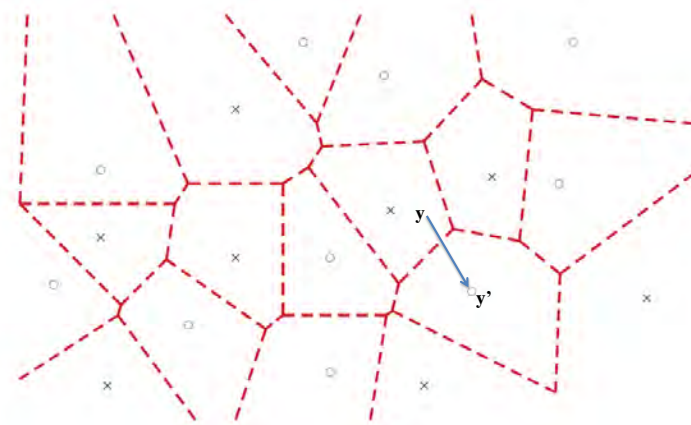


Figure 3.4 – Principe de la quantification basée sur la modulation de l'index (QIM) de (Chen et Wornell, 2001).

3.2.3 Phase d'insertion

Algorithme 3.1 Insertion du tatouage.

1. Calculer la saillance du maillage 3D original en utilisant l'approche de Lee *et al.* (2005).
 2. Extraire les sommets saillants en utilisant le seuil S .
 3. Générer la marque à l'aide d'un générateur pseudo-aléatoire en utilisant la clé secrète Clé 1.
 4. Quantifier les normes euclidiennes ($\|\cdot\|_2$) des sommets saillants en calculant les deux quantificateurs Q_{zero} et Q_{one} pour les bits 0 et 1, respectivement en utilisant l'équation 3.5.
 5. Reconstruire le maillage 3D tatoué à partir des normes modifiées en utilisant l'équation 3.7.
-

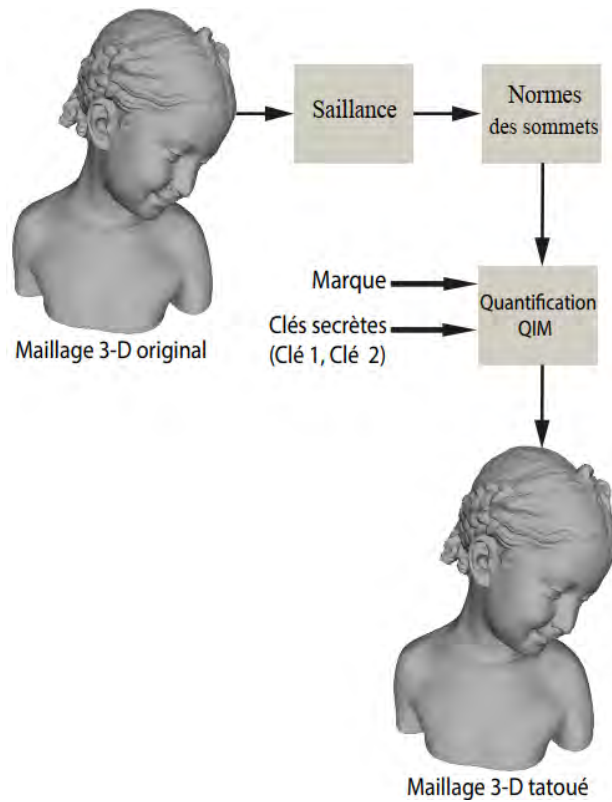


Figure 3.5 – Processus d’insertion du tatouage.

Ce travail tire pleinement profit des avantages de la saillance de maillages et de la quantification QIM afin d’assurer une bonne imperceptibilité tout en étant robuste à une multitude d’attaques. L’insertion de la marque se repose sur la quantification des normes des sommets saillants. Premièrement, la saillance du maillage est calculée et un seuil est fixé afin de déterminer les sommets saillants et les sommets non saillants. En fait, pour chaque vecteur de saillance calculé, nous prenons les sommets qui ont une valeur de saillance supérieure à un seuil S qui représente 70% de valeurs maximales de l’intervalle de la saillance. Les sommets ayant une valeur de saillance inférieure à ce seuil sont considérés non saillants. Si nous supposons que les valeurs du vecteur de saillance calculée d’un objet 3D sont dans l’intervalle $[0, 1]$. Les sommets dont la saillance correspondante est supérieure

à 0.7 sont considérés saillants et le reste des sommets sont considérés non saillants. Deuxièmement, la norme euclidienne des sommets saillants est calculé en fonction du seuil fixé. La marque est générée en utilisant un générateur pseudo-aléatoire à l'aide de la clé secrète (Clé 1). Ensuite, deux quantificateurs Q_{zero} et Q_{one} sont calculés en utilisant l'équation 3.5 en fonction du bit de la marque. Q_{zero} pour le bit 0, et Q_{one} pour le bit 1. Finalement, les nouvelles coordonnées des sommets après tatouage sont calculées à partir des normes des sommets modifiées en utilisant l'équation 3.7 afin de reconstruire le maillage 3D tatoué. Il est à noter que le pas de quantification est considéré comme une seconde clé secrète qui va être utilisée dans la phase d'extraction. L'algorithme 3.1 décrit les étapes d'insertion présentées dans la Figure 3.5.

$$V'(x', y', z') = \frac{\|V'\|}{\|V\|} V(x, y, z) \quad (3.7)$$

où $V'(x', y', z')$ sont les nouvelles coordonnées des sommets modifiés par le tatouage, et $V(x, y, z)$ représentent les coordonnées initiales des sommets avant tatouage. $\|V'\|$ et $\|V\|$ sont les normes des sommets modifiés et des sommets avant tatouage respectivement.

3.2.4 Phase d'extraction

Algorithme 3.2 Extraction du tatouage.

1. Calculer la saillance du maillage 3D tatoué en utilisant l'approche de Lee *et al.* (2005) et en extraire les sommets saillants en se basant sur le seuil S .
 2. Calculer les normes des sommets saillants.
 3. Recalculer les deux quantificateurs Q_{zero} et Q_{one} en utilisant l'équation 3.5.
 4. Extraire les bits de la marque en utilisant l'équation 3.6.
-

L'extraction de la marque est aveugle car seules les clés secrètes (Clé 1 et Clé 2) sont nécessaires. Tout d'abord, la saillance du modèle 3D tatoué est calculée et les sommets saillants sont extraits à l'aide du seuil fixé lors de l'insertion de la marque.

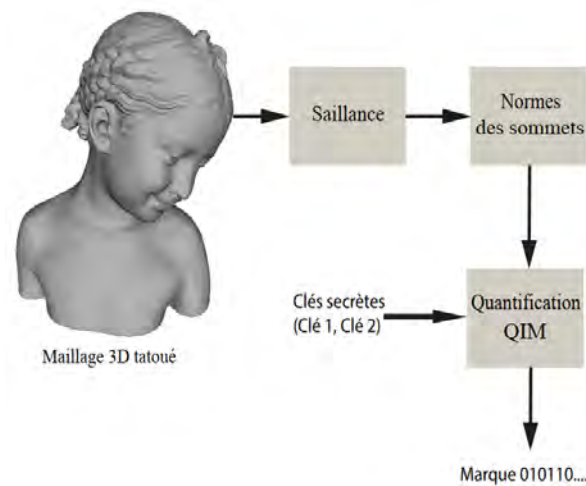


Figure 3.6 – Processus d’extraction du tatouage.

Ensuite, les normes des sommets choisis sont calculées. Les deux quantificateurs Q_{zero} et Q_{one} sont calculés en utilisant l’équation 3.5, et les bits de la marque extraits sont obtenus à l’aide de l’équation 3.6. L’algorithme 3.2 décrit les étapes suivies pour extraire le tatouage présentées dans la Figure 3.6.

3.3 Résultats expérimentaux

Nous avons réalisés des tests sur plusieurs maillages 3D avec des complexités différentes : Flower (2523 sommets, 4895 facettes), Vase (2527 sommets, 5004 facettes), Cup (9076 sommets, 18152 facettes), Ant (7654 sommets, 15304 facettes), Bimba (8857 sommets, 17710 facettes) et cat (3534 vertices, 6975 facettes). La Figure 3.7(a-d) montre quelques maillages originaux utilisés dans les expérimentations. Il est à noter que pour des raisons de comparaison, l’évaluation de l’imperceptibilité et la robustesse est effectuée sur les modèles : Bunny (34835 sommets, 69666 facettes), Horse (112642 sommets, 225280 facettes) et Venus (100759 sommets, 201514 facettes). Le pas de quantification est choisi de façon à assurer un bon compromis entre la robustesse et l’imperceptibilité. Ce paramètre est ajusté

expérimentalement et fixé à ($\Delta = 0.08$). Plusieurs métriques ont été utilisées pour mesurer l'impact du processus d'insertion de tatouage. Cette distorsion est mesurée géométriquement et perceptuellement. Les métriques "Maximum Root Mean Square Error" (MRMS) Cignoni *et al.* (1998) et la distance de Hausdorff "Hausdorff distance" (HD) sont utilisées pour calculer la distorsion objective entre le maillage original et le maillage tatoué. "The mesh structural distortion measure" (MSDM) est utilisée pour mesurer la dégradation visuelle qu'ont subi les maillages tatoués (Lavoué *et al.*, 2006). La robustesse est mesurée en utilisant la corrélation normalisée (*Corr*) entre la marque insérée et la marque extraite. Dans les deux sous-sections qui suivent, nous allons évaluer les performances de la méthode proposée en termes d'imperceptibilité et de robustesse.

3.3.1 Imperceptibilité

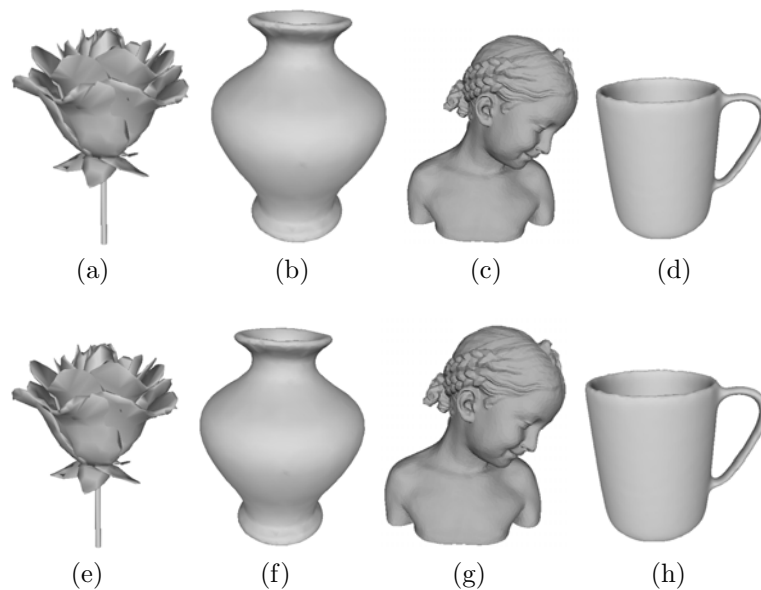


Figure 3.7 – Objets Originaux Vs objets tatoués : (a) Flower original, (b) Vase original, (c) Bimba original, (d) Vase original, (e) Flower tatoué, (f) Vase tatoué, (g) Bimba tatoué, (h) Cup tatoué.

Tableau 3.1 – Imperceptibilité du tatouage mesurée en termes de MRMS, HD et MSDM.

| Modèle | MRMS (10^{-3}) | HD (10^{-3}) | MSDM |
|--------|--------------------|------------------|------|
| Flower | 0.63 | 4.33 | 0.30 |
| Vase | 0.41 | 3.34 | 0.37 |
| Cup | 0.98 | 2.95 | 0.37 |
| Ant | 0.62 | 4.19 | 0.51 |
| Cat | 0.61 | 1.0 | 0.16 |
| Bimba | 0.39 | 1.63 | 0.10 |

La Figure 3.7 illustre un exemple de maillages originaux et leurs correspondants tatoués. Nous pouvons constater qu’il n’existe pas de distorsion visible après insertion de tatouage. En outre, nous avons pu obtenir une bonne imperceptibilité en termes des métriques MRMS, HD et MSDM, comme le montre le Tableau 3.1. Ces performances sont obtenues grâce à l’exploitation des avantages de la saillance pour éviter les distorsions sérieuses. Nous pouvons observer que les résultats d’imperceptibilité en termes de MRMS, HD et MSDM sont différents d’un maillage à l’autre. Ceci est dû principalement à la nature différente de courbure de chacun de ces maillages 3D. Pour mieux évaluer l’importance de l’utilisation de la saillance pour améliorer les performances d’imperceptibilité dans la méthode proposée, nous la comparons aux résultats obtenus sans utilisation de la saillance. Le Tableau 3.2 présente une comparaison de performances d’imperceptibilité en termes de MRMS, HD et MSDM entre la méthode proposée basée sur la saillance et sans utilisation de cette dernière. D’après le Tableau 3.2, nous pouvons constater que l’utilisation de la saillance améliore les performances d’imperceptibilité par rapport au schéma qui ne se base pas sur la saillance indépendamment du maillage utilisé.

Tableau 3.2 – Imperceptibilité du tatouage sans et avec utilisation de la saillance mesurée en termes de MRMS, HD et MSDM.

| Modèle | MRMS (10^{-3}) | HD (10^{-3}) | MSDM |
|--------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Flower | 0.89/ 0.63 | 5.03/ 4.33 | 0.88/ 0.30 |
| Vase | 0.58/ 0.41 | 4.76/ 3.34 | 0.76/ 0.37 |
| Cup | 1.02/ 0.98 | 3.45/ 2.95 | 0.87/ 0.37 |
| Ant | 0.83/ 0.62 | 4.43/ 4.19 | 1.0/ 0.51 |
| Cat | 1.2/ 0.61 | 1.9/ 1.0 | 0.29/ 0.16 |
| Bimba | 0.76/ 0.39 | 2.98/ 1.63 | 1.66/ 0.10 |

3.3.2 Robustesse

Pour évaluer la robustesse du schéma proposé, les maillages 3D ont été exposés à plusieurs attaques, notamment l’addition de bruit, le lissage, la quantification, la coupe, les transformations de similarité (translation, rotation et mise à l’échelle uniforme), la subdivision, etc. À cette fin, un ”Benchmark” est utilisé (Wang *et al.*, 2010). La Figure 3.8 montre le modèle Bimba après plusieurs attaques. Pour évaluer la robustesse de l’attaque par ajout de bruit, un bruit additif a été ajouté à chaque sommet du modèle 3D avec quatre amplitudes différentes : 0, 05%, 0, 10%, 0, 30% et 0, 50 %. Les résultats illustrés dans le Tableau 3.3, montrent que la méthode a pu résister à l’ajout de bruit pour tous les modèles de test.

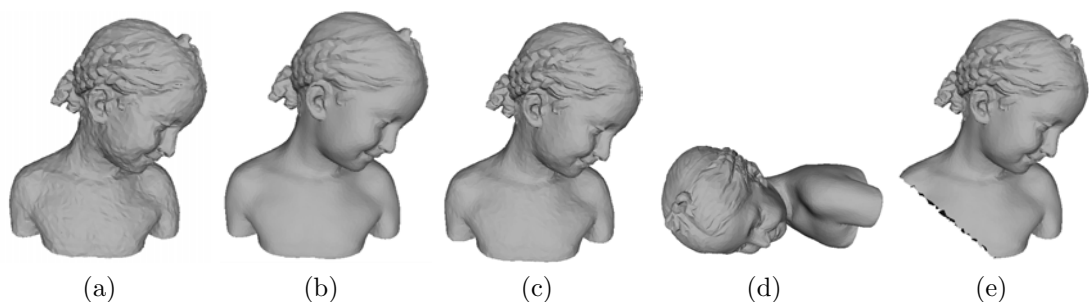


Figure 3.8 – Cinq versions d’attaques appliquées à Bimba : (a) ajout de bruit 0.50%, (b) lissage $\lambda = 0.1$ avec 5 itérations, (c) quantification 9 bits, (d) transformation de similarité, (e) coupe (10.0%).

La résistance du schéma proposé est évaluée contre le lissage et le réarrangement des éléments. Les modèles 3D ont subi un lissage Laplacien (Taubin, 2000) en utilisant 5, 10, 30 et 50 itérations avec un facteur de déformation $\lambda = 0.10$. Le Tableau 3.3 montre que notre méthode est capable de résister aux opérations de lissage et de réarrangement des éléments.

La quantification est aussi appliquée aux maillages 3D en utilisant 7, 8, 9, 10 et 11 bits. Nous pouvons conclure du Tableau 3.4 que la méthode proposée présente une bonne résistance à la quantification, quel que soit le maillage 3D utilisé.

La robustesse est aussi évaluée contre les transformations de similarité dans lesquelles les modèles 3D ont subi une rotation, une mise à échelle uniforme et une translation aléatoire. Les résultats obtenus ont montré que l'algorithme proposé est capable de résister à ce type d'attaque (voir Tableau 3.4).

Les maillages 3D ont été exposés aussi à l'attaque de subdivision comprenant trois schémas : loop, midpoint et sqrt3 (Zorin, 2000). Les résultats obtenus dans le Tableau 3.4 en termes de corrélation montrent une bonne résistance à la subdivision.

Enfin, l'attaque de coupe est appliquée aux maillages de test. Elle est considérée comme l'une des attaques les plus destructives, car elle supprime une région du maillage 3D et les informations utiles seront donc perdues. Comme illustré dans le Tableau 3.4, nous observons que la méthode proposée n'est pas suffisamment robuste à la coupe. En effet, si la partie supprimée contient les sommets saillants, l'extraction du tatouage va échouer. Dans les travaux futur, nous allons chercher une solution afin de rendre le schéma plus robuste contre cette attaque. Une solution efficace serait d'insérer la marque d'une façon redondante dans la majorité des régions du maillage 3D.

Tableau 3.3 – Robustesse du tatouage contre le bruit additif, lissage Laplacien et réarrangement des éléments mesurée en termes de corrélation.

| Paramètres | Bruit additif | | | | Lissage Laplacien | | | | Réarrangement des éléments | | |
|------------|---------------|-------|-------|-------|-------------------|------|------|------|----------------------------|-------|-------|
| | 0.05% | 0.10% | 0.30% | 0.50% | 5 | 10 | 30 | 50 | Type1 | Type2 | Type3 |
| Flower | 0.98 | 0.94 | 0.89 | 0.81 | 1.0 | 0.99 | 0.98 | 0.89 | 1.0 | 0.95 | 1.0 |
| Vase | 1.0 | 0.91 | 0.85 | 0.71 | 1.0 | 0.98 | 0.97 | 0.86 | 1.0 | 0.96 | 1.0 |
| Cup | 0.96 | 0.93 | 0.83 | 0.78 | 1.0 | 1.0 | 0.90 | 0.87 | 1.0 | 1.0 | 0.98 |
| Ant | 0.97 | 0.95 | 0.86 | 0.77 | 0.99 | 0.97 | 0.93 | 0.85 | 1.0 | 0.98 | 1.0 |
| Cat | 0.99 | 0.91 | 0.88 | 0.73 | 1.0 | 0.95 | 0.95 | 0.90 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Bimba | 1.0 | 0.93 | 0.90 | 0.80 | 1.0 | 1.0 | 0.94 | 0.91 | 0.99 | 0.97 | 0.96 |

Tableau 3.4 – Robustesse du tatouage contre la quantification, les transformations de similarité, la subdivision et la coupe mesurée en termes de corrélation.

| Paramètres | Quantification | | | | | Transformations de similarité | | | Subdivision | | | Coupe | | |
|------------|----------------|------|------|------|------|-------------------------------|-------|-------|-------------|----------|-------|-------|------|------|
| | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | Type1 | Type2 | Type3 | Loop | Midpoint | Sqrt3 | 10% | 30% | 50% |
| Flower | 1.0 | 1.0 | 0.98 | 0.91 | 0.80 | 1.0 | 0.95 | 0.98 | 1.0 | 0.93 | 1.0 | 0.56 | 0.44 | 0.28 |
| Vase | 1.0 | 1.0 | 0.98 | 0.91 | 0.78 | 0.92 | 0.94 | 0.98 | 0.98 | 0.87 | 0.96 | 0.59 | 0.31 | 0.12 |
| Cup | 1.0 | 0.99 | 0.97 | 0.93 | 0.83 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.84 | 0.94 | 0.67 | 0.37 | 0.16 |
| Ant | 1.0 | 1.0 | 0.97 | 0.92 | 0.77 | 0.94 | 0.96 | 1.0 | 0.94 | 0.91 | 1.0 | 0.61 | 0.45 | 0.21 |
| Cat | 1.0 | 0.97 | 1.0 | 0.93 | 0.76 | 1.0 | 1.0 | 0.96 | 0.95 | 0.94 | 1.0 | 0.58 | 0.30 | 0.22 |
| Bimba | 1.0 | 1.0 | 0.99 | 0.98 | 0.86 | 0.98 | 1.0 | 0.90 | 0.98 | 0.95 | 0.96 | 0.50 | 0.22 | 0.17 |

3.3.3 Comparaison avec les méthodes alternatives

Pour évaluer plus en détail les performances du schéma proposé en termes d'imperceptibilité et de robustesse, nous le comparons aux schémas de Cho *et al.* (2006), Wang *et al.* (2008b), Zhan *et al.* (2014), Rolland-Neviere *et al.* (2014) et Son *et al.* (2017). Pour ce faire, nous avons effectué les tests en utilisant les modèles 3-D *Bunny*, *Horse* et *Venus*.

Tableau 3.5 – Comparaison d'imperceptibilité avec les schémas de Cho *et al.* (2006), Rolland-Neviere *et al.* (2014) et Son *et al.* (2017) mesurée en termes de MRMS et MSDM pour le modèle *Horse*.

| Métrique | (Cho <i>et al.</i> , 2006) | (Rolland-Neviere <i>et al.</i> , 2014) | (Son <i>et al.</i> , 2017) | Méthode proposée |
|--------------------|----------------------------|--|----------------------------|------------------|
| MRMS (10^{-3}) | 3.17 | 1.48 | 2.90 | 0.53 |
| MSDM | 0.3197 | 0.2992 | 0.3197 | 0.2865 |

Le Tableau 3.5 présente la comparaison d'imperceptibilité avec quelques schémas de l'état de l'art en termes de MRMS et de MSDM. Les résultats obtenus

illustrent la bonne imperceptibilité de notre technique et montrent sa supériorité par rapport aux méthodes alternatives. Nous avons mené aussi une comparaison avec les méthodes de Cho *et al.* (2006) et Zhan *et al.* (2014) en termes d'imperceptibilité utilisant MRMS et NC en termes de robustesse contre l'ajout de bruit, le lissage et la quantification pour les objets Bunny et Venus. Les Tableaux 3.6 et 3.7 présentent les résultats de comparaison de robustesse en termes de corrélation avec les schémas de Cho *et al.* (2006) et de Zhan *et al.* (2014).

Tableau 3.6 – Comparaison de robustesse de la méthode proposée avec les schémas de Cho *et al.* (2006) et de Zhan *et al.* (2014) contre le bruit additif, le lissage et la quantification en termes de corrélation pour Bunny.

| Modèle | Bunny | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
| Attaque | Ajout de bruit | | | Lissage | | | Quantification | | |
| Paramètres | 0.1% | 0.3% | 0.5% | 10 | 30 | 50 | 9 | 8 | 7 |
| (Cho <i>et al.</i> , 2006) | 0.72 | 0.72 | 0.66 | 0.84 | 0.60 | 0.36 | 0.73 | 0.58 | 0.17 |
| (Zhan <i>et al.</i> , 2014) | 1.0 | 0.91 | 0.80 | 0.92 | 0.85 | 0.44 | 1.0 | 0.91 | 0.58 |
| Méthode proposée | 1.0 | 0.93 | 0.84 | 0.97 | 0.91 | 0.58 | 1.0 | 0.92 | 0.67 |

Nous pouvons conclure que la présente méthode est assez robuste au bruit additif, au lissage et à la quantification et surpasse les méthodes alternatives (voir Tableaux 3.6 et 3.7).

Tableau 3.7 – Comparaison de robustesse de la méthode proposée avec les schémas de Cho *et al.* (2006) et de Zhan *et al.* (2014) contre le bruit additif, le lissage et la quantification en termes de corrélation pour Venus.

| Modèle | Venus | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
| Attaque | Ajout de bruit | | | Lissage | | | Quantification | | |
| Paramètres | 0.1% | 0.3% | 0.5% | 10 | 30 | 50 | 9 | 8 | 7 |
| (Cho <i>et al.</i> , 2006) | 0.94 | 0.87 | 0.27 | 0.94 | 0.63 | 0.45 | 0.87 | 0.48 | 0.07 |
| (Zhan <i>et al.</i> , 2014) | 0.95 | 0.95 | 0.79 | 0.95 | 0.93 | 0.78 | 1.0 | 0.83 | 0.73 |
| Méthode proposée | 1.0 | 0.98 | 0.81 | 1.0 | 0.99 | 0.79 | 1.0 | 0.90 | 0.85 |

La supériorité de la méthode proposée en termes d'imperceptibilité et de robustesse est justifiée par l'utilisation de la saillance qui montre une stabilité relative

aux manipulations que peut subir le maillage telles que l'ajout de bruit, quantification, lissage, etc., d'une part, et par l'utilisation de la quantification QIM qui assure un bon compromis capacité-robustesse d'autre part.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de tatouage de maillage 3D robuste et aveugle basée sur la saillance et la quantification QIM pour la protection des droits d'auteur. Nous avons décrit le schéma global de l'approche proposée à savoir le processus d'insertion et d'extraction du tatouage. La méthode proposée atteint des bonnes performances en termes de robustesse et d'imperceptibilité. La contrainte de robustesse est obtenue en quantifiant les normes des sommets à l'aide de la quantification QIM, tandis que l'imperceptibilité est assurée en ajustant l'insertion dans les parties saillante du maillage 3D. Les résultats expérimentaux montrent que le schéma proposé, non seulement offre un bon compromis entre l'imperceptibilité et la robustesse, mais il surpasse les méthodes existantes contre la majorité des attaques courantes, notamment le lissage, la quantification, l'ajout de bruit, la subdivision, etc. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter une nouvelle méthode de tatouage de maillage qui exploite les avantages de la quantification QIM et la saillance dans le domaine multirésolution.

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons notre troisième contribution qui consiste à proposer un tatouage de maillages 3D semi-réguliers. La méthode aveugle et robuste se base sur la transformation en ondelettes et la saillance avec pour objectif de protéger les droits d’auteur (*Copyright protection*). La section 4.2 présente le schéma global de la méthode proposée. Ensuite, les résultats expérimentaux sont discutés dans la section 4.3. Finalement, nous comparons les performances en termes d’imperceptibilité et de robustesse avec les techniques existantes.

4.2 Méthode proposée

Dans cette section, nous présentons en détails la méthode de tatouage des maillages semi-réguliers proposée pour la protection des droits d’auteur. La technique présentée se base sur la saillance des maillages proposée par Lee *et al.* (2005) et la transformée en ondelettes. Les notions de bases de la saillance et la quantification QIM sont détaillées dans la contribution précédente (voir 3.2.1 et 3.2.2). Dans la sous section 4.2.1, nous présentons le concept de base de la décomposition en ondelettes. La contribution majeure dans ce travail est l’utilisation de la

quantification QIM des coefficients d'ondelettes ainsi que la saillance afin d'assurer une bonne imperceptibilité et une résistance à une large gamme d'attaques. La contrainte d'imperceptibilité est assurée en exploitant les avantages de la saillance dans le but de définir les coefficients d'ondelettes à quantifier. En effet, les sommets saillants montrent une relative stabilité aux différentes attaques. La robustesse est atteinte en utilisant le schéma de quantification QIM des coefficients d'ondelettes sélectionnés. La primitive de synchronisation de la marque est la distance entre le centre de gravité du maillage et les sommets saillants. En premier lieu, l'analyse multirésolution est appliquée au maillage 3D semi-régulier original, donnant une série de maillages d'approximation et une séquence de coefficients d'ondelettes. Ensuite, la saillance est calculée pour le maillage obtenu après une deux décompositions en ondelettes et les sommets saillants sont extraits. L'utilisation du niveau I est due au bon compromis atteint entre l'imperceptibilité et la capacité. Par la suite, les normes des coefficients d'ondelettes de ces sommets sont quantifiées à l'aide de la quantification QIM. Le rôle principal de la saillance est de définir les normes de coefficients d'ondelettes candidates à quantifier. Les coefficients d'ondelettes, qui correspondent aux sommets ayant les plus grandes valeurs de saillance, sont choisis et leurs normes sont quantifiées. Un seuil (T_r) représentant le maximum de 70% des valeurs du vecteur de saillance ont été adoptées pour tous les maillages 3D. Les schémas d'insertion et d'extraction sont présentés dans les Figures 4.1 et 4.2, respectivement.

4.2.1 Transformée en ondelettes

L'analyse multirésolution appliquée aux maillages 3D a été largement utilisée dans la littérature car elle garantit un bon compromis entre la complexité du maillage et le traitement de la ressource disponible (Dodgson *et al.*, 2006). Elle permet de produire différentes représentations du maillage 3D partant des basses

fréquences (maillage grossier) jusqu'aux moyennes et hautes fréquences (maillage dense) représentant les informations de détails à différents niveaux de résolution. Le principe de décomposition en ondelettes est expliqué en détails dans la sous-section 1.6.4. Le but derrière l'utilisation de l'analyse multiresolution est motivé par le fait qu'elle permet l'insertion du tatouage dans plusieurs niveaux de résolution et permet d'assurer un bon compromis entre la robustesse et l'imperceptibilité.

4.2.2 Phase d'insertion

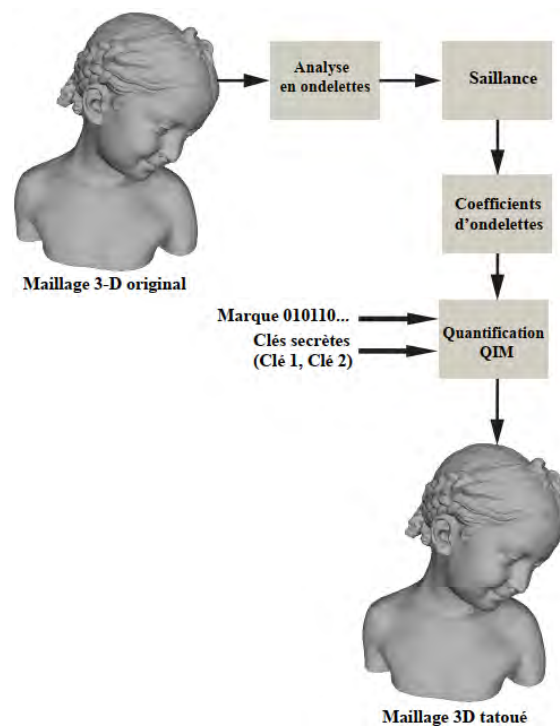


Figure 4.1 – Schéma de processus d'insertion de tatouage.

La première étape est d'effectuer une analyse en ondelettes jusqu'au niveau I , après avoir appliqué une décomposition en ondelettes du maillage original. Les bits de la marque sont insérés en modifiant les normes des coefficients d'ondelettes suivant les sommets triés dans un ordre prédéfini. Cet ordre est défini comme la distance euclidienne entre les sommets et le centre de gravité du maillage. Tout

d'abord, les sommets sont triés dans l'ordre décroissant en fonction de leur distance au centre du maillage. Ensuite, les sommets saillants du niveau I sont extraits en calculant la saillance. Par la suite, les coefficients d'ondelettes correspondant aux sommets saillants du niveau I et leurs normes euclidiennes sont calculées. Afin de définir les sommets saillants, nous fixons le seuil Tr pour choisir les coefficients d'ondelettes candidats à modifier dans la procédure d'insertion. Le paramètre Tr représente 70% des valeurs maximales de la saillance du maillage. Ainsi, les normes des coefficients d'ondelettes correspondant aux sommets saillants sont quantifiées en utilisant le schéma de quantification QIM. Finalement, le maillage 3D tatoué est reconstruit à partir des normes des coefficients d'ondelettes modifiées en utilisant l'équation (4.1) (Wang *et al.*, 2009).

$$V'(x', y', z') = \frac{\|W_{C'}\|}{\|W_C\|} V(x, y, z) \quad (4.1)$$

où $\|W_{C'}\|$ et $\|W_C\|$ représentent le coefficient d'ondelette modifié après insertion de tatouage et le coefficient d'ondelette calculé avant l'insertion de tatouage, respectivement. $V'(x', y', z')$ est la nouvelle coordonnée du sommet du maillage tatoué, et $V(x, y, z)$ est la coordonnée du sommet du maillage original. La Figure 4.1 illustre le processus d'insertion de la marque décrit en détails dans l'Algorithme 4.1.

Algorithme 4.1 Procédure d'insertion de la marque

1. Effectuer une analyse en ondelettes jusqu'au niveau intermédiaire I .
 2. Extraire les sommets saillants du maillage 3D du niveau I en utilisant la saillance.
 3. Trouver les coefficients d'ondelettes correspondants aux sommets saillants suivant le seuil T_r et calculer leurs normes correspondantes.
 4. Quantifier les normes euclidiennes ($\|\cdot\|_2$) des coefficients d'ondelettes en utilisant le schéma QIM.
 5. Reconstruire le maillage tatoué à partir des normes des coefficients d'ondelettes modifiées.
-

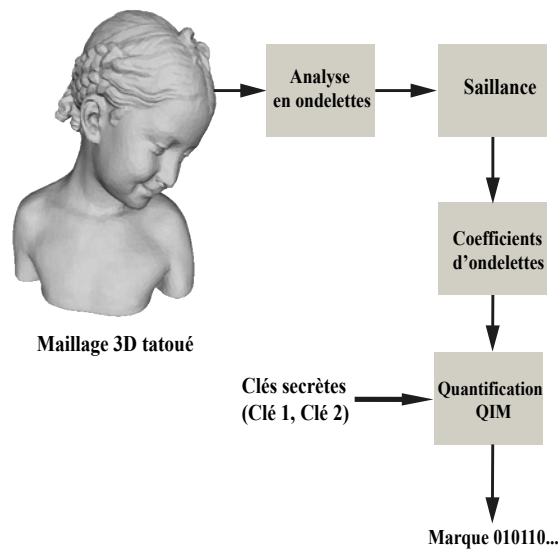


Figure 4.2 – Schéma de processus d'extraction de tatouage.

4.2.3 Phase d'extraction

L'extraction de la marque est simple et aveugle. En effet, seules les clés secrètes (clé 1, clé 2) qui représentent respectivement, le générateur de la marque et le pas de quantification sont nécessaires dans la phase d'extraction. Tout d'abord, l'analyse multirésolution est appliquée au maillage 3D tatoué en effectuant une décomposition en ondelettes jusqu'au niveau I . Ensuite, la saillance du maillage tatoué est calculée et les coefficients d'ondelettes modifiés sont définis en fonction du seuil T_r . Les normes des coefficients d'ondelettes modifiés sont re-quantifiées à l'aide du même quantificateur utilisé lors de l'insertion du tatouage. Enfin, les bits de la marque sont extraits. La Figure 4.2 illustre la procédure d'extraction de la marque présentée en détails dans l'Algorithme 4.2.

Algorithme 4.2 Procédure d'extraction de la marque

1. Effectuer une analyse en ondelettes jusqu'au niveau intermédiaire I .
 2. Calculer la saillance du maillage tatoué et extraire les coefficients d'ondelettes modifiés à l'aide du seuil T_r .
 3. Calculer les normes des coefficients d'ondelettes extraits et appliquer la quantification QIM.
 4. Extraire les bits de la marque en utilisant l'équation(3.6).
-

4.3 Résultats expérimentaux

Dans ce travail, nous avons testé les performances d'imperceptibilité et de robustesse sur plusieurs objets 3D : Bunny (34835 sommets, 69666 facettes), Horse (112642 sommets, 225280 facettes), Venus (100759 sommets, 201514 facettes), Armadillo (26002 sommets, 52000 facettes), Rabbit (70658 sommets, 141312 facettes), Flower (2523 sommets, 4895 facettes), Vase (2527 sommets, 5004 facettes), Cup (9076 sommets, 18152 facettes), Ant (7654 sommets, 15304 facettes), Bimba (8857 sommets, 17710 facettes), et Cat (3534 sommets, 6975 facettes). La Figure 4.6(a,c,e) présente un exemple de trois maillages 3D originaux. Le pas de quantification est ajusté expérimentalement de manière à garantir le meilleur compromis entre l'imperceptibilité et la robustesse.

Pour ce faire, de nombreuses expérimentations ont été menées (voir Figures 4.3–4.5) en utilisant des valeurs empiriques différentes de pas de quantification Δ . Ces expérimentations ont été effectuées pour tous les maillages 3D. La meilleure valeur trouvée est $\Delta = 0.10$, obtenue après plusieurs expérimentations sur les maillages 3D de test. Le paramètre T_r , qui représente le seuil utilisé pour déterminer les coefficients d'ondelettes candidates, est pris comme étant les 70% valeurs maximales de la saillance. La taille de la marque utilisée dans les simulations est de 64 bits. Afin d'évaluer l'imperceptibilité de notre approche, la distorsion induite par l'insertion de la marque est comparée objectivement et visuellement en utili-

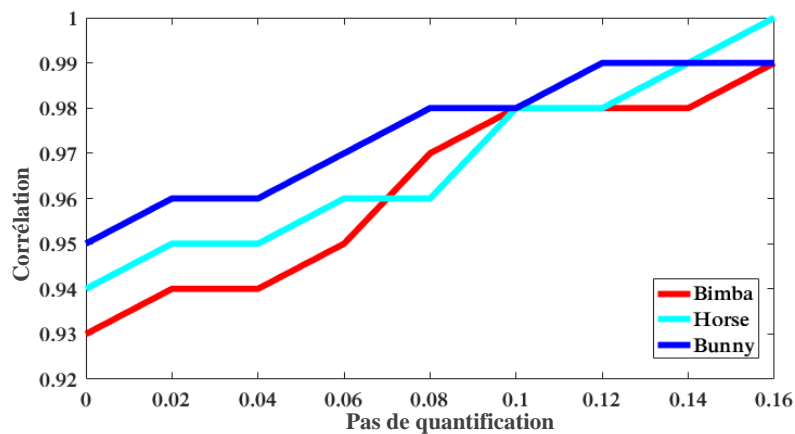


Figure 4.3 – Performance de robustesse en termes de corrélation utilisant plusieurs pas de quantification pour les modèles Bimba, Horse et Bunny.

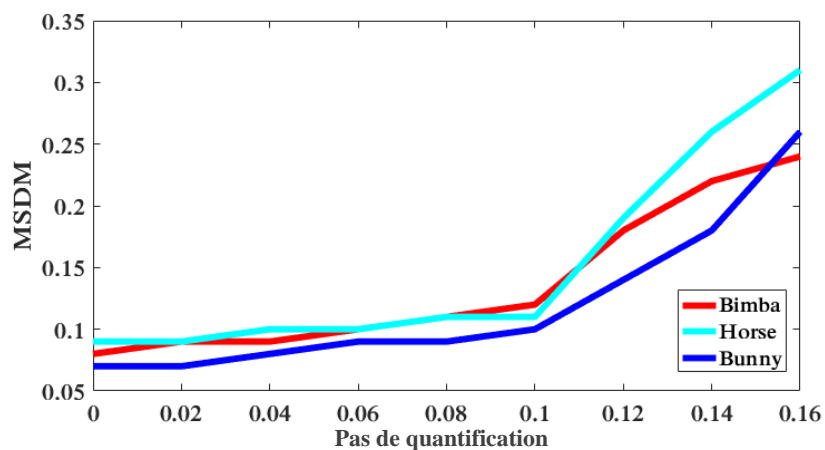


Figure 4.4 – Performance d'imperceptibilité en termes de mesure structurelle de distorsion (MSDM) utilisant différents pas de quantification pour les modèles Bimba, Horse, et Bunny.

sant les métriques (MRMS) Cignoni *et al.* (1998), (HD) Aspert *et al.* (2002) et (MSDM) Lavoué *et al.* (2006) évoquées dans les chapitres précédents. La robustesse de la marque est évaluée en calculant la corrélation normalisée (NC) entre la marque insérée et la marque extraite. L'implémentation de certaines fonctions sous Matlab comme celle calculant les ondelettes a été basée sur les fonctions prédéfinies

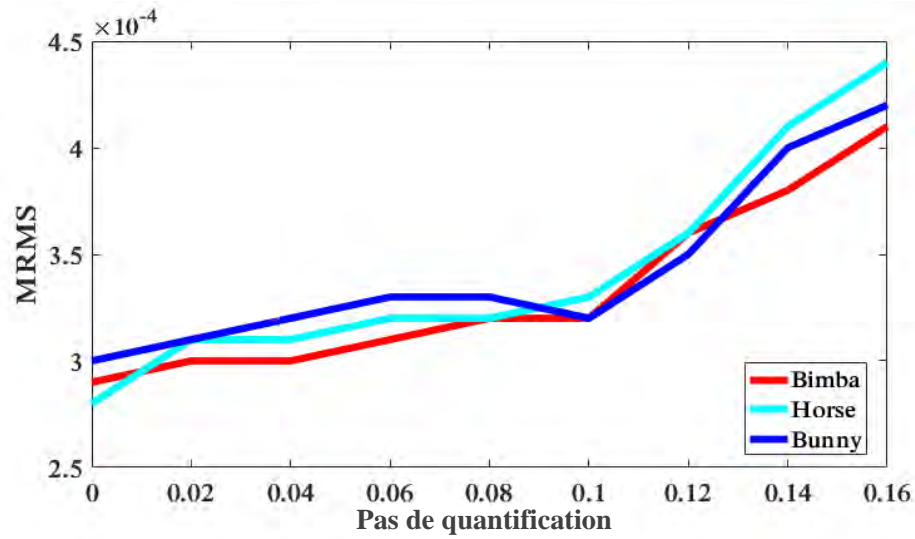


Figure 4.5 – Performance d'imperceptibilité en termes de l'erreur quadratique maximum (MRMS) utilisant différents pas de quantification pour les modèles Bimba, Horse, et Bunny.

dans le toolbox de Peyré (2011).

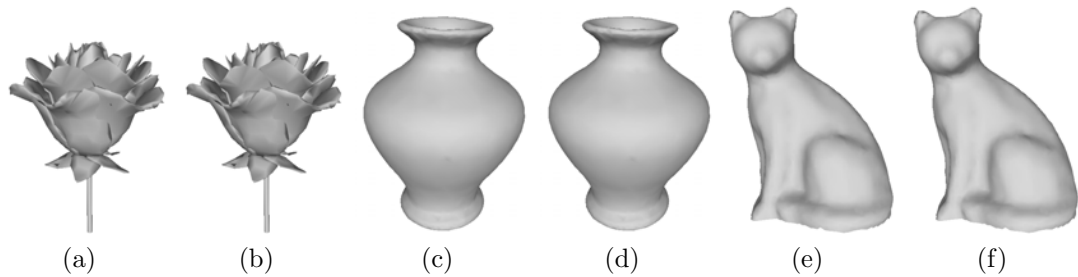


Figure 4.6 – Maillages originaux Vs maillages tatoués : (a) Flower original; (b) Flower tatoué; (c) Vase original; (d) Vase tatoué; (e) Cat original; (f) Cat tatoué.

4.3.1 Imperceptibilité

La Figure 4.6 montre les objets originaux et les objets tatoués. On peut voir que la distorsion est négligeable et ne peut pas être remarquée par l'œil humain

grâce à l'utilisation de saillance du maillage dans le processus d'insertion. Cela signifie que l'imperceptibilité est suffisante pour que le spectateur ait du mal à distinguer le maillage original du maillage tatoué. La Figure 4.7 illustre l'impact visuel de la marque causé par l'insertion du tatouage pour les maillages Bunny, Bimba, et Cat, où on peut remarquer que le processus d'insertion ne dégrade pas la qualité des maillages tatoués, notamment dans les régions saillantes. Ces résultats ont été validés par les valeurs des métriques MRMS, HD et MSDM (voir Tableau 4.1). Grâce à l'exploitation de la saillance des maillages nous avons pu minimiser les distorsions après insertion de la marque. En fait, seuls les coefficients d'ondelettes correspondants aux sommets saillants sont modifiés. Il est remarqué aussi que les résultats d'imperceptibilité en termes de MRMS, HD, et MSDM varient d'un maillage à l'autre suite à la différence de complexité de courbure qui change suivant le maillage utilisé. Afin d'évaluer l'importance de l'utilisation de la saillance, nous comparons les performances d'imperceptibilité en termes de MRMS, HD et MSDM sans et avec utilisation de la saillance. Les résultats obtenus pour six maillages 3D sont répertoriés dans le Tableau 4.2. Selon ce Tableau, le schéma basé sur la saillance de maillages donne des scores d'imperceptibilité plus élevés que sans utilisation de saillance, ce qui illustre l'importance de cette dernière pour améliorer les performances d'imperceptibilité, en particulier pour la mesure structurelle de distorsion (MSDM), qui est en corrélation avec la perception humaine.

Tableau 4.1 – Imperceptibilité de la marque mesurée en termes de MRMS, HD et MSDM.

| Modèle | MRMS (10^{-3}) | HD (10^{-3}) | MSDM |
|--------|--------------------|------------------|------|
| Flower | 0.43 | 3.23 | 0.24 |
| Vase | 0.32 | 2.86 | 0.34 |
| Cup | 0.78 | 2.58 | 0.31 |
| Ant | 0.41 | 3.87 | 0.38 |
| Cat | 0.49 | 0.78 | 0.18 |
| Bimba | 0.31 | 1.41 | 0.12 |

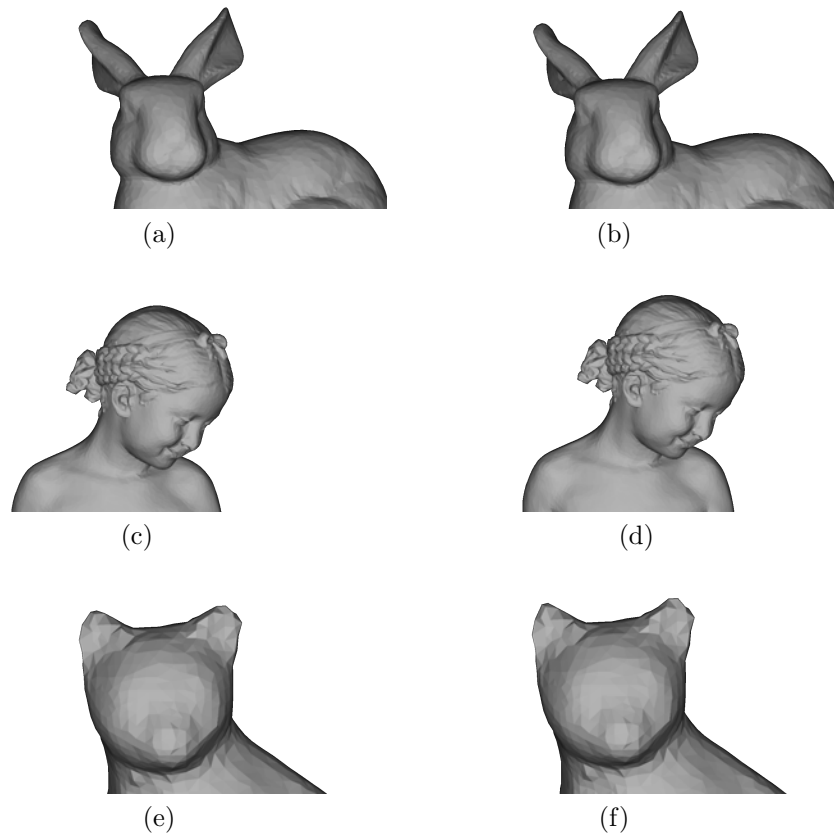


Figure 4.7 – Gros plans des maillages originaux et tatoués : (a) Bunny original ; (b) Bunny tatoué ; (c) Bimba original ; (d) Bimba tatoué ; (e) Cat original ; (f) Cat tatoué.

Tableau 4.2 – Imperceptibilité de la marque sans et avec saillance mesurée en termes de MRMS, HD, et MSDM.

| Modèle | MRMS (10^{-3}) | HD (10^{-3}) | MSDM |
|--------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Flower | 0.84/ 0.43 | 4.88/ 3.23 | 0.78/ 0.24 |
| Vase | 0.55/ 0.32 | 4.67/ 2.86 | 0.75/ 0.34 |
| Cup | 0.09/ 0.78 | 3.22/ 2.58 | 0.81/ 0.31 |
| Ant | 0.77/ 0.41 | 3.36/ 3.87 | 0.89/ 0.38 |
| Cat | 0.95/ 0.49 | 1.8/ 0.78 | 0.28/ 0.18 |
| Bimba | 0.74/ 0.31 | 2.88/ 1.41 | 0.61/ 0.12 |

4.3.2 Robustesse

La robustesse est testée sur plusieurs attaques, notamment le réarrangement d'éléments, l'ajout de bruit, le lissage, la quantification, les transformations de similarité, la rotation, la mise à l'échelle uniforme et la coupe. Pour ce faire, nous utilisons le Benchmark de Wang *et al.* (2010). La Figure 4.8 montre l'objet Bimba après ces attaques. La robustesse est mesurée à l'aide de la corrélation normalisée.

Tableau 4.3 – Robustesse de la marque contre l'ajout de bruit mesurée en termes de corrélation NC.

| Intensité | Flower | Vase | Cup | Ant | Cat | Bimba |
|-----------|--------|------|------|------|------|-------|
| 0.05% | 1.0 | 1.0 | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 1.0 |
| 0.10% | 0.98 | 0.96 | 0.96 | 0.95 | 0.93 | 0.95 |
| 0.30% | 0.86 | 0.88 | 0.86 | 0.92 | 0.91 | 0.90 |
| 0.50% | 0.83 | 0.77 | 0.79 | 0.81 | 0.83 | 0.84 |

L'attaque d'ajout de bruit vise à ajouter un bruit pseudo-aléatoire aux coordonnées des sommets du maillage. Nous avons appliqué cette attaque aux maillages 3D tatoués en utilisant plusieurs amplitudes : 0,05% , 0,10% , 0,30% et 0,50%. Les résultats de robustesse en termes de corrélation des six maillages 3D de test illustrés au Tableau 4.3, montrent que le schéma est résistant au bruit.

Tableau 4.4 – Robustesse du tatouage contre le lissage Laplacien ($\lambda = 0.1$) mesurée en termes de corrélation.

| Nombre d'itérations | Flower | Vase | Cup | Ant | Cat | Bimba |
|---------------------|--------|------|------|------|------|-------|
| 5 | 1.0 | 0.99 | 1.0 | 0.99 | 1.0 | 1.0 |
| 10 | 1.09 | 0.99 | 0.98 | 1.0 | 0.98 | 0.98 |
| 30 | 0.99 | 0.97 | 0.93 | 0.95 | 0.94 | 0.94 |
| 50 | 0.93 | 0.92 | 0.91 | 0.88 | 0.90 | 0.95 |

La résistance de la marque est testée aussi contre l'attaque de lissage. Il s'agit d'une opération commune qui a pour but la suppression du bruit causé par la génération du maillage. Le lissage appliqué aux maillages 3D tatoués est le lissage

Laplacien (Taubin, 1995) avec un facteur de déformation ($\lambda = 0.1$) avec différents nombre d'itérations (5, 10, 30, et 50). Le Tableau 4.4 présente l'évaluation de la robustesse en termes de corrélation normalisée (NC). Ce Tableau, illustre la résistance contre cette attaque. Même avec 50 itérations, les valeurs de corrélation obtenues pour les six objets sont supérieures à 0.88.

La performance de robustesse a été étudiée pour l'attaque de réarrangement d'éléments dans laquelle les sommets/facettes sont réorganisés. Il ressort clairement du Tableau 4.5 que la méthode présente une bonne résistance aux manipulations de réarrangement des éléments.

Les maillages 3D tatoués ont été exposés à la quantification en utilisant différents paramètres : 11 bits, 10 bits, 9 bits, 8 bits, et 7 bits. La robustesse contre cette attaque est évaluée en termes de corrélation comme le montre le Tableau 4.6. Selon les résultats obtenus, la méthode a prouvé une bonne résistance à l'attaque de quantification.

La transformation de similarité est une attaque usuelle à laquelle chaque technique de tatouage 3D doit être capable de résister. Elle inclut la rotation, la translation et la mise en échelle uniforme et leur combinaison, tout en gardant la forme du maillage intacte. Le Tableau 4.8 montre les valeurs de corrélation normalisée (NC) après avoir appliqué trois types de transformations de similarité utilisés dans le Benchmark de Wang *et al.* (2010). Nous pouvons conclure de ce Tableau que le tatouage est robuste à cette attaque à l'instar du maillage utilisé.

La subdivision est l'une des manipulations géométriques les plus utilisées qu'un objet 3D peut subir. Elle consiste à ajouter des sommets et des arêtes au maillage 3D dans le but d'obtenir une version modifiée avec une meilleure qualité visuelle contenant plus de détails. Les maillages 3D de test ont été exposés à trois schémas de subdivision (loop, midpoint et $\sqrt{3}$) en utilisant une seule itération (Zorin, 2000). Le Tableau 4.9 présente les résultats de corrélation obtenus après avoir effectué les

trois subdivisions mentionnées auparavant. Selon ce Tableau, la méthode possède une bonne résistance aux trois schémas de subdivision pour tous les objets 3D de test, avec des valeurs de corrélation NC supérieures à 0.9.

L'attaque de la coupe fait partie des attaques géométriques les plus sévères qu'un maillage 3D peut subir. En effet, cette attaque consiste à couper une seule partie ou plusieurs parties du maillage 3D. Cette attaque a été appliquée aux objets 3D en utilisant différentes proportions (10%, 30%, et 50%). Comme illustré dans le Tableau 4.10, nous pouvons constater que la robustesse à cette attaque est relativement faible. Cette situation est dû au fait que les régions coupées peuvent contenir des sommets saillants sur lesquels nous nous sommes basés pour déterminer les coefficients d'ondelettes à quantifier. Par conséquent, ces derniers seront perdus et l'extraction de la marque va échouer.

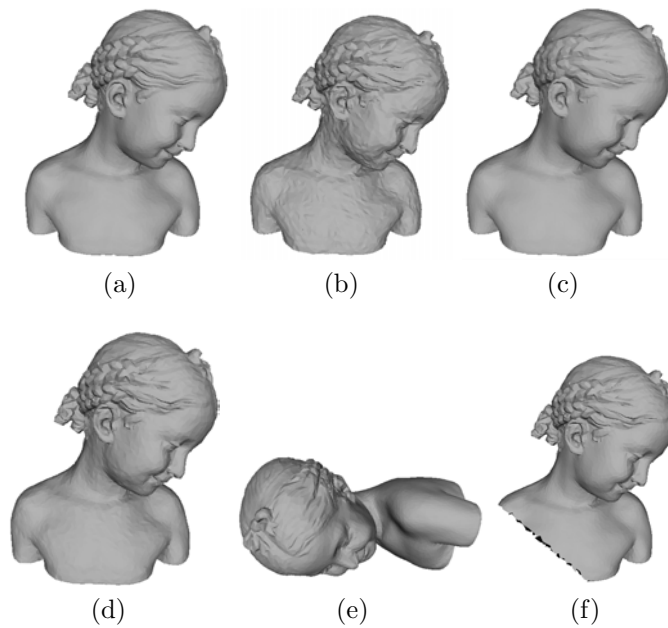


Figure 4.8 – Bimba original et cinq attaques appliquées à l'objet Bimba :

- (a) Bimba original, (b) bruit additif (0.50%),
- (c) lissage ($\lambda = 0.1$) avec 5 itérations, (d) quantification 9 bits,
- (e) transformation de similarité (Rotation), (f) coupe (10.0%).

Tableau 4.5 – Robustesse de la marque contre le réarrangement d'éléments évaluée en termes de corrélation.

| Réarrangement d'éléments | Flower | Vase | Cup | Ant | Cat | Bimba |
|----------------------------|--------|------|------|------|-----|-------|
| Réarrangement d'éléments 1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Réarrangement d'éléments 2 | 0.99 | 0.98 | 1.0 | 0.97 | 1.0 | 0.99 |
| Réarrangement d'éléments 3 | 1.0 | 1.0 | 0.97 | 1.0 | 1.0 | 0.99 |

Tableau 4.6 – Robustesse de la marque contre la quantification.

| Quantification | Flower | Vase | Cup | Ant | Cat | Bimba |
|----------------|--------|------|------|------|------|-------|
| 11 bits | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 10 bits | 1.0 | 1.0 | 0.99 | 1.0 | 0.97 | 1.0 |
| 9 bits | 0.99 | 0.99 | 0.97 | 0.99 | 1.0 | 0.98 |
| 8 bits | 0.95 | 0.94 | 0.93 | 0.94 | 0.96 | 0.96 |
| 7 bits | 0.83 | 0.83 | 0.81 | 0.82 | 0.82 | 0.91 |

Tableau 4.7 – Résultats de comparaison de robustesse de la méthode proposée avec celle de Son *et al.* (2017) en termes de taux d'erreur binaire (BER) contre l'attaque de quantification.

| Quantification | Son <i>et al.</i> (2017) | Méthode proposée |
|----------------|--------------------------|------------------|
| 7-bit | 0.23 | 0.14 |
| 8-bit | 0.15 | 0.09 |
| 9-bit | 0.14 | 0.06 |
| 10-bit | 0.03 | 0.02 |
| 11-bit | 0.01 | 0.01 |

Tableau 4.8 – La robustesse de la méthode proposée contre les transformations de similarité en termes de corrélation.

| Transformation de similarité | Flower | Vase | Cup | Ant | Cat | Bimba |
|------------------------------|--------|------|-----|------|------|-------|
| Type 1 | 1.0 | 0.97 | 1.0 | 0.98 | 1.0 | 0.99 |
| Type 2 | 0.98 | 0.96 | 1.0 | 0.98 | 1.0 | 1.0 |
| Type 3 | 0.99 | 0.99 | 1.0 | 1.0 | 0.98 | 0.94 |

4.3.3 Comparaison avec les méthodes alternatives

Pour évaluer davantage les performances du système proposé, nous avons fait une comparaison avec les méthodes de Cho *et al.* (2006), Wang *et al.* (2008b),

Tableau 4.9 – Robustesse du tatouage contre l’attaque de subdivision en termes de corrélation.

| Subdivision | Flower | Vase | Cup | Ant | Cat | Bimba |
|-------------|--------|------|------|------|------|-------|
| Loop | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.98 | 0.98 | 0.99 |
| Midpoint | 0.94 | 0.90 | 0.91 | 0.92 | 0.95 | 0.96 |
| Sqrt3 | 0.99 | 0.97 | 0.96 | 0.99 | 1.0 | 0.98 |

Tableau 4.10 – Robustesse de tatouage contre l’attaque de coupe en termes de corrélation.

| Coupe | Flower | Vase | Cup | Ant | Cat | Bimba |
|-------|--------|------|------|------|------|-------|
| 10% | 0.55 | 0.59 | 0.64 | 0.61 | 0.68 | 0.52 |
| 30% | 0.45 | 0.32 | 0.37 | 0.41 | 0.38 | 0.34 |
| 50% | 0.32 | 0.15 | 0.17 | 0.22 | 0.24 | 0.19 |

Rolland-Neviere *et al.* (2014), Son *et al.* (2017), et Medimegh *et al.* (2018) en termes d’imperceptibilité et de robustesse.

Tableau 4.11 – Comparaison d’imperceptibilité de la méthode proposée avec les schémas de Cho *et al.* (2006), Rolland-Neviere *et al.* (2014) et Son *et al.* (2017) en termes de MRMS et MSDM pour le modèle Horse.

| Méthode | MRMS (10^{-3}) | MSDM |
|--------------------------------------|--------------------|---------------|
| Cho <i>et al.</i> (2006) | 3.17 | 0.3197 |
| Rolland-Neviere <i>et al.</i> (2014) | 1.48 | 0.2992 |
| Son <i>et al.</i> (2017) | 2.90 | 0.3197 |
| Méthode proposée | 0.38 | 0.2254 |

Concernant l’imperceptibilité, nous pouvons conclure du Tableau 4.11 que le schéma proposé donne des bons résultats et dépassent les schémas de Cho *et al.* (2006); Rolland-Neviere *et al.* (2014) et Son *et al.* (2017) en termes de MRMS et MSDM.

D’après le Tableau 4.12, on peut remarquer que la méthode proposée permet d’obtenir de bonnes performances d’imperceptibilité et dépasse le schéma de Wang *et al.* (2008b) en termes de MRMS et HD pour les trois objets *Venus*, *Horse* et *Rabbit*.

Tableau 4.12 – Comparaison d'imperceptibilité avec la méthode de Wang *et al.* (2008b) en termes de MRMS et MSDM pour les modèles Horse et Venus.

| Objet | Venus | Horse | Rabbit |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| MRMS (10^{-3}) | 1.21/ 0.72 | 0.64/ 0.62 | 1.12/ 0.54 |
| HD (10^{-3}) | 5.87/ 2.18 | 2.65/ 1.86 | 3.99/ 3.63 |

Tableau 4.13 – Comparaison d'imperceptibilité avec les méthodes de Cho *et al.* (2006) et Medimegh *et al.* (2018) en termes de distance d'Hausdorff (HD).

| Objet | Méthode | Distance d'Hausdorff ($\times 10^{-3}$) |
|-------|-------------------------------|---|
| Bunny | Cho <i>et al.</i> (2006) | 0.73 |
| | Medimegh <i>et al.</i> (2018) | 0.41 |
| | Méthode proposée | 0.36 |
| Venus | Cho <i>et al.</i> (2006) | 2.50 |
| | Medimegh <i>et al.</i> (2018) | 3.90 |
| | Méthode proposée | 1.71 |
| Horse | Cho <i>et al.</i> (2006) | 3.21 |
| | Medimegh <i>et al.</i> (2018) | 2.90 |
| | Méthode proposée | 1.57 |

Comme illustré dans le Tableau 4.13, comparé aux méthodes de Cho *et al.* (2006) et Medimegh *et al.* (2018) en termes de distance d'Hausdorff (HD), le schéma proposé peut atteindre la meilleure performance. En effet, les valeurs de (HD) obtenues pour les maillages Bunny, Venus, et Horse, sont toutes inférieures à 1.71. Selon le Tableau 4.14, la technique proposée montre une robustesse supérieure aux techniques de Cho *et al.* (2006) et Medimegh *et al.* (2018) contre l'ajout de bruit et le lissage.

Tableau 4.14 – Comparaison de robustesse avec les schémas de Cho *et al.* (2006) et Medimegh *et al.* (2018) en termes de corrélation NC.

| Attaques | Cho <i>et al.</i> (2006) | Medimegh <i>et al.</i> (2018) | Méthode proposée |
|---------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
| Sans attaque | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Bruit additif 0.10% | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Lissage | 0.88 | 0.87 | 1.0 |
| Coupe 10% | 0.2 | 1.0 | 0.66 |

Néanmoins, nous avons pas obtenu de résultats comparables à la méthode de Medimegh *et al.* (2018) concernant l'attaque de coupe. En effet, dans la méthode de Medimegh *et al.* (2018), la marque est insérée dans plusieurs patches d'une façon redondante, ce qui la rend plus robuste à l'attaque de coupe. La Figure 4.9 montre que la technique proposée peut résister à différentes attaques, notamment l'ajout de bruit, la quantification, et le lissage. En outre, la méthode proposée assure une robustesse supérieure comparée à la méthode de Cho *et al.* (2006).

Tableau 4.15 – Comparaison de robustesse avec la méthode de Son *et al.* (2017) en termes de BER contre le lissage.

| Lissage | Son <i>et al.</i> (2017) | Méthode proposée |
|---------|--------------------------|------------------|
| 0 | 0.15 | 0.10 |
| 10 | 0.24 | 0.16 |
| 30 | 0.45 | 0.28 |
| 50 | 0.58 | 0.41 |

La robustesse en termes de corrélation normalisée (NC) est comparée au schéma de Wang *et al.* (2008b) contre l'ajout de bruit, la quantification, et le lissage avec différents paramètres. Concernant l'ajout de bruit, trois amplitudes ont été utilisées dans la comparaison. La quantification est appliquées avec trois niveaux 9 bits, 8 bits, et 7 bits. Pour le lissage, l'objet Rabbit est exposé à cette manipulation avec un facteur de déformation fixe $\lambda = 0.10$ et différents nombres d'itérations. On peut conclure de la Figure 4.10 que le schéma proposé montre une robustesse supérieure comparée au schéma de Wang *et al.* (2008b) en termes de corrélation pour l'ajout de bruit, la quantification et le lissage.

Par ailleurs, comme illustré dans le Tableau 4.15, la méthode proposée est capable de résister à l'attaque de lissage et les résultats obtenus en termes de taux d'erreur binaire (BER) de notre méthode sont supérieures à ceux de Son *et al.* (2017).

Les Tableaux 4.16, 4.17, et 4.18 présentent la comparaison de robustesse avec

Tableau 4.16 – Comparaison de qualité et de robustesse avec le schéma Wang *et al.* (2008b) contre le bruit mesurée en termes de MRMS, HD et MSDM.

| Modèle | Bruit | NC | MRMS (10^{-3}) | HD (10^{-3}) | MSDM |
|--------|-------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Venus | 0.05% | 0.97 /0.85 | 0.16 /0.17 | 0.58 /0.62 | 0.12 /0.28 |
| | 0.25% | 0.88 /0.59 | 0.36 /0.84 | 0.81 /3.15 | 0.26 /0.70 |
| | 0.50% | 0.78 /0.31 | 0.41 /1.67 | 2.23 /6.25 | 0.38 /0.83 |
| Horse | 0.05% | 0.98 /0.96 | 0.18 /0.11 | 0.37 /0.41 | 0.17 /0.23 |
| | 0.25% | 0.92 /0.50 | 0.35 /0.55 | 1.3 /2.03 | 0.32 /0.64 |
| | 0.5% | 0.77 /0.08 | 0.79 /1.10 | 2.98 /4.07 | 0.39 /0.78 |

Tableau 4.17 – Comparaison des résultats de qualité et robustesse avec la méthode de Wang *et al.* (2008b) contre la quantification en termes de MRMS, HD, MSDM, et NC.

| Modèle | Paramètre | NC | MRMS (10^{-3}) | HD (10^{-3}) | MSDM |
|--------|-----------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Venus | 9 bits | 0.96 /0.93 | 0.18 /0.93 | 0.31 /1.95 | 0.17 /0.49 |
| | 8 bits | 0.93 /0.70 | 0.76 /1.85 | 2.4 /3.90 | 0.23 /0.66 |
| | 7 bits | 0.81 /0.63 | 1.65 /3.70 | 4.1 /7.80 | 0.28 /0.79 |
| Horse | 9 bits | 0.97 /0.61 | 0.31 /0.68 | 1.87 /1.95 | 0.19 /0.44 |
| | 8 bits | 0.89 /0.25 | 0.51 /1.35 | 1.02 /3.90 | 0.24 /0.60 |
| | 7 bits | 0.78 /0.17 | 1.1 /2.70 | 3.21 /7.80 | 0.13 /0.73 |

(Wang *et al.*, 2008b), contre l'ajout de bruit, la quantification et le lissage pour les modèles Venus et Horse, respectivement. Les métriques d'évaluation de l'imperceptibilité utilisées dans la comparaison sont : l'erreur quadratique maximum (MRMS), la distance d'Hausdorff (HD), et la mesure structurelle de distorsion (MSDM). Concernant la robustesse, la comparaison est effectuée à l'aide de la corrélation normalisée (NC).

Afin d'effectuer une comparaison de robustesse contre l'attaque de bruit, les maillages Horse et Venus ont été exposés à un bruit additif en utilisant trois amplitudes 0.05%, 0.25%, et 0.5%. Selon le Tableau 4.16, on peut voir une supériorité considérable de la méthode proposée par rapport à la méthode de Wang *et al.* (2008b) contre l'ajout de bruit en termes d'imperceptibilité (MRMS, HD, et MSDM), et de robustesse (NC).

Tableau 4.18 – Comparaison des résultats d’imperceptibilité et de robustesse avec le schéma de Wang *et al.* (2008b) contre le lissage Laplacien ($\lambda = 0.1$) en termes de MRMS, HD, MSDM, et NC.

| Modèle | Itérations | NC | MRMS (10^{-3}) | HD (10^{-3}) | MSDM |
|--------|------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Venus | 10 | 1.0 /0.74 | 0.31 /0.27 | 1.87 /5.65 | 0.14 /0.15 |
| | 30 | 0.98 /0.71 | 0.66 /0.68 | 3.95 /9.75 | 0.23 /0.27 |
| | 50 | 0.93 /0.62 | 0.73 /1.01 | 5.54 /12.20 | 0.31 /0.34 |
| Horse | 10 | 0.99 /0.95 | 0.19 /0.21 | 3.98 /5.67 | 0.14 /0.15 |
| | 30 | 0.96 /0.50 | 0.33 /0.54 | 4.16 /9.97 | 0.16 /0.23 |
| | 50 | 0.92 /0.35 | 0.68 /0.80 | 8.87 /12.95 | 0.24 /0.28 |

L’attaque de quantification (9 bits, 8 bits, et 7 bits) a été appliquée aux maillages 3D tatoués Venus et Horse. Comme illustré dans le Tableau 4.17, on peut constater la bonne résistance de notre méthode à l’attaque de quantification pour les deux objets utilisés dans la comparaison. En outre, le Tableau 4.17 montre la supériorité de notre méthode par rapport à celle de Wang *et al.* (2008b). Par ailleurs, la robustesse du schéma proposé est comparée au schéma de Son *et al.* (2017) montrée dans le Tableau 4.7. Ce Tableau illustre la supériorité de la technique proposée par rapport au schéma de Son *et al.* (2017).

Les modèles Venus et Horse ont été exposés au lissage Laplacien avec un facteur de déformation $\lambda = 0.10$, utilisant 10, 30, et 50 itérations. Nous pouvons conclure du Tableau 4.18 que la méthode donne des résultats meilleurs par rapport à la méthode de Wang *et al.* (2008b) en termes de robustesse. De plus, les résultats obtenus en termes d’imperceptibilité évalués en utilisant MRMS, HD, et MSDM montrent la supériorité de notre méthode. Le Tableau 4.19 illustre une comparaison de robustesse avec la méthode de Cho *et al.* (2006) en termes de corrélation pour l’objet Bunny. D’après le Tableau 4.19, nous pouvons constater que notre méthode est assez robuste au bruit additif, à la quantification, à la simplification et au lissage. A cela s’ajoute que la méthode proposée dépasse largement la technique de Cho *et al.* (2006) en termes de robustesse concernant les attaques que nous venons

Tableau 4.19 – Résultats de comparaison de corrélation normalisée NC de la méthode proposée avec Cho *et al.* (2006) pour le modèle Bunny.

| Attaque | Paramètres | Cho <i>et al.</i> (2006) | Méthode proposée |
|----------------|------------|--------------------------|------------------|
| Bruit | 0.1% | 0.87 | 0.99 |
| | 0.3% | 0.51 | 0.90 |
| | 0.5% | 0.18 | 0.84 |
| Quantification | 9-bit | 0.94 | 0.99 |
| | 8-bit | 0.88 | 0.95 |
| | 7-bit | 0.39 | 0.89 |
| Lissage | (10, 0.03) | 0.75 | 0.92 |
| | (30, 0.03) | 0.57 | 0.88 |
| | (50, 0.03) | 0.46 | 0.71 |
| Simplification | 32.11% | 0.94 | 0.98 |
| | 51.44% | 0.77 | 0.85 |
| | 70.79% | 0.58 | 0.71 |
| | 90.65% | 0.38 | 0.46 |

de mentionner. Nous pouvons également constater du Tableau 4.20 que nous arrivons à obtenir une bonne résistance à une large gamme d'attaques, notamment l'ajout de bruit, la quantification, le lissage et la simplification, supérieure à la méthode de Nakazawa *et al.* (2010).

En somme, la majorité des schémas de tatouage 3D proposés précédemment basés sur la saillance donnent de bonnes performances en termes d'imperceptibilité grâce à l'utilisation de cette caractéristique perceptuelle. Cependant, ils présentent généralement une faiblesse aux attaques car ils utilisent le domaine spatial pour insérer le tatouage. La nouveauté de la méthode proposée est qu'elle donne de bons résultats à la fois en termes d'imperceptibilité et en termes de robustesse grâce à l'exploitation des avantages du schéma de quantification QIM et de la saillance des maillages et l'analyse multirésolution.

Tableau 4.20 – Résultats de comparaison de corrélation normalisée NC de la méthode proposée avec (Nakazawa *et al.*, 2010) pour le modèle Bunny.

| Attaque | Paramètres (Nakazawa <i>et al.</i> , 2010) | Méthode proposée |
|----------------|--|------------------|
| Bruit | 0.1% | 0.99 |
| | 0.3% | 0.90 |
| | 0.5% | 0.84 |
| Quantification | 9-bit | 0.99 |
| | 8-bit | 0.95 |
| | 7-bit | 0.89 |
| Lissage | (10, 0.03) | 0.92 |
| | (30, 0.03) | 0.88 |
| | (50, 0.03) | 0.71 |
| Simplification | 32.11% | 0.98 |
| | 51.44% | 0.85 |
| | 70.79% | 0.71 |
| | 90.65% | 0.46 |

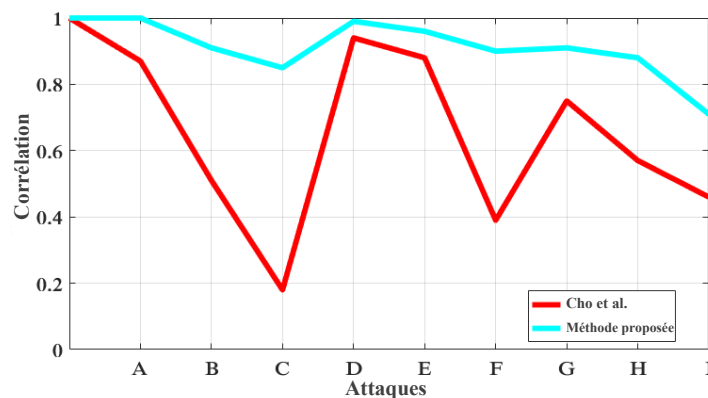


Figure 4.9 – La robustesse de la méthode Cho *et al.* (2006) comparée à la méthode proposée en termes de corrélation NC pour l'objet Bunny contre différentes attaques ; A : bruit 0.1% ; B : bruit 0.3% ; C : bruit 0.5% ; D : quantification 9 bits ; E : quantification 8 bits ; F : quantification 7 bits ; G : lissage ($\lambda = 0.3$, 10 itérations) ; H : lissage ($\lambda = 0.3$, 30 itérations) ; I : lissage ($\lambda = 0.3$, 50 itérations).

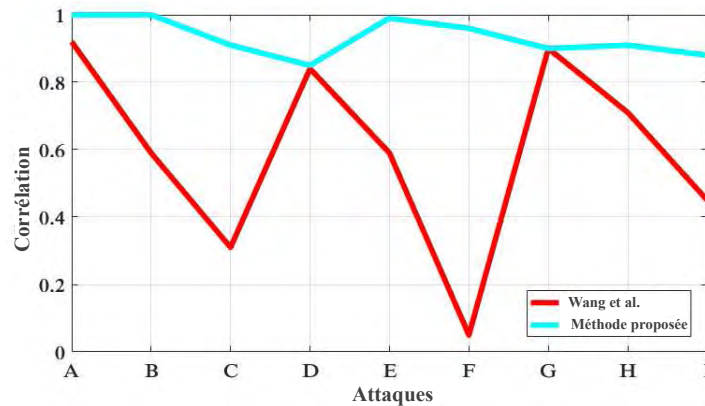


Figure 4.10 – La robustesse de la méthode Wang *et al.* (2008b) comparée à la méthode proposée en termes de corrélation NC pour l’objet Bunny contre différentes attaques ; A : bruit 0.05% ; B : bruit 0.25% ; C : bruit 0.5% ; D : quantification 9 bits ; E : quantification 8 bits ; F : quantification 7 bits ; G : lissage ($\lambda = 0.1$, 10 itérations) ; H : lissage ($\lambda = 0.1$, 30 itérations) ; I : lissage (0.1, 50 itérations).

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode robuste et aveugle basée sur la quantification des normes des coefficients d’ondelettes et la saillance des maillages pour la protection des droits d’auteur. Nous avons réalisé une série de manipulations expérimentales qui a montré que la méthode proposée est à la fois imperceptible et robuste à une variété d’attaques géométriques et non-géométriques. Ces performances ont été obtenues grâce à l’exploitation des avantages de la saillance et la quantification QIM dans le domaine de multirésolution. Les résultats obtenus ont été validés par des métriques objectives et perceptuelles, et ont montré leurs supériorités par rapport aux méthodes de l’état de l’art.



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cette partie nous allons présenter une synthèse de l'ensemble des travaux réalisés durant cette thèse et par la suite, proposer quelques perspectives de recherche.

Conclusions

L'objectif de cette thèse est de proposer des méthodes robustes de tatouage d'images et de maillages 3D pour la protection des droits d'auteur.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté les notions de base du tatouage numérique d'images 2D et de maillages 3D. Nous avons commencé par décrire le schéma général du tatouage d'images/maillages 3D. Nous avons énuméré par la suite les contraintes de tatouage ainsi que les attaques sur les images 2D et les maillages 3D. Nous avons également présenté la modélisation géométrique des objets 3D, les domaines d'application et les métriques d'évaluation des schémas de tatouage 2D (respectivement 3D). Finalement, nous avons conclu ce chapitre par une classification des méthodes de tatouage d'images 2D et de maillages 3D.

Dans la première contribution, présentée dans le chapitre 2, nous avons proposé

un schéma de tatouage aveugle et robuste dans le domaine hybride DFT-DCT où nous avons exploité les avantages de ces deux transformées afin de garantir un très bon compromis robustesse-imperceptibilité. Une couche de sécurité est ajoutée en appliquant un pré-traitement de cryptage à la marque en utilisant la transformation d'Arnold. Les résultats obtenus ont montré les bonnes performances de notre approche par rapport aux méthodes existantes.

Dans le chapitre 3, nous avons proposé un système de tatouage robuste et aveugle en exploitant le concept de la saillance de maillages et la quantification par modulation de l'index (QIM) pour la protection des droits d'auteur. Les expérimentations menées ont montré que cette technique a prouvé son efficacité en termes de robustesse et d'imperceptibilité.

Dans le chapitre 4, nous avons présenté une méthode robuste et aveugle basée sur la quantification des normes des coefficients d'ondelettes et la saillance des maillages pour la protection des droits d'auteur. Cette technique, qui exploite les avantages de la saillance et la quantification QIM, est évaluée en utilisant des métriques objectives et perceptuelles, a pu assurer un bon compromis robustesse-imperceptibilité et a montré sa supériorité par rapport aux méthodes de l'état de l'art.

Perspectives

Dans cette section, nous citons quelques perspectives de recherche de cette thèse. Concernant le tatouage d'images 2D, les perspectives de recherche sont nombreuses, on cite en l'occurrence :

- Améliorer le travail proposé en introduisant l'intelligence artificielle afin d'ajuster automatiquement les paramètres qui contrôlent la puissance de tatouage

pour assurer un bon compromis entre l'imperceptibilité et la robustesse. L'utilisation des techniques de *Deep Learning* pourrait être un bon choix.

- Proposer un schéma de tatouage plus robuste aux attaques, notamment les manipulations géométriques qui visent à désynchroniser la marque.
- Appliquer la méthode proposée (contribution 1) dans le cas des images couleurs dans les espaces (RGB, HSV, YCbCr, etc) et réaliser une études comparative pour savoir le meilleur espace couleur assurant le compromis robustesse-imperceptibilité.

En ce qui concerne le tatouage de maillages 3D, nous avons comme première perspective, la réalisation des méthodes de tatouage d'enrichissement de contenu en utilisant l'analyse multirésolution. Cette dernière dispose plusieurs avantages telles que la multitude de niveaux intermédiaires où on peut insérer le tatouage, ce qui permettra d'assurer un bon compromis robustesse-imperceptibilité-capacité. Dans ce contexte, suite aux exigences du domaine médical, nos travaux de recherche concerneront la proposition des méthodes de tatouages de haute capacité qui auront pour but la dissimulation des informations personnelles des patients ainsi que leurs rapports de diagnostic, etc. Dans ce sens, le transfert des données numériques dans la télé-médecine, telles que les radios scanner et IRM (imagerie par résonance magnétique), nous a poussé à penser aux méthodes de tatouage de maillages fragile afin d'assurer le contrôle d'intégrité des radios IRM afin d'éviter un faux diagnostic.

Une autre perspective est le design d'une méthode robuste a une gamme plus large d'attaques, notamment aux attaques de connectivité et à la coupe, où la majorité des méthodes proposées dans la littérature sont vulnérables, en utilisant un descripteur de forme local robuste, comme primitive de tatouage, ou en insérant la marque de manière redondante. Nous allons essayer aussi de faire face aux attaques

de désynchronisation de la marque, en proposant des primitives de synchronisation robustes et invariantes à ces manipulations.

Nous envisagerons aussi d'utiliser les techniques d'apprentissage profond "*deep learning*" dans le choix des primitives de tatouage des maillages 3D. L'utilisation de ces techniques dans le tatouage de maillages 3D constituerait une piste de recherche prometteuse.

Il est à noter également que la recherche dans le tatouage de maillages 3D est liée étroitement avec les avancées dans les techniques de traitement géométrique. En conséquence, l'avancement dans ces méthodes, va influencer positivement sur la recherche dans le domaine de tatouage de maillages 3D.



LISTE DES PUBLICATIONS

Revue internationale

1. **Hamidi, M.**, Chetouani, A., El Haziti, M., El Hassouni, M. and Cherifi, H., 2019. Blind robust 3D mesh watermarking based on mesh saliency and wavelet transform for copyright protection. *Information*, 10(2), p.67.
2. **Hamidi, M.**, El Haziti, M., Cherifi, H. and El Hassouni, M., 2018. Hybrid blind robust image watermarking technique based on DFT-DCT and Arnold transform. *Multimedia Tools and Applications*, 77(20), pp.27181-27214.

Conférences internationales

1. **Hamidi, M.**, Chetouani, A., El Haziti, M., El Hassouni, M. and Cherifi, H. Blind Robust 3-D Mesh Watermarking based on Mesh Saliency and QIM quantization for Copyright Protection. Madrid, Spain, July 1-4,2019. *Pattern Recognition and Image Analysis : 9th Iberian Conference, IbPRIA 2019*, Springer.
2. **Hamidi, M.**, Chetouani, A., El Haziti, M., El Hassouni, M. and Cherifi, H., 2019, April. A Robust Blind 3-D Mesh Watermarking Technique Based on SCS Quantization and Mesh Saliency for Copyright Protection. In *International Conference on Mobile, Secure, and Programmable Networking*,

MSPN'19, (pp. 211-228). Springer, Cham.

3. **Hamidi, M.**, El Haziti, M., Cherifi, H. and Aboutajdine, D., 2017, May. A robust blind 3-D mesh watermarking based on wavelet transform for copyright protection. In 2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP) (pp. 1-6). IEEE.
4. **Hamidi, M.**, El Haziti, M., Cherifi, H. and Aboutajdine, D., 2015, November. A blind robust image watermarking approach exploiting the DFT magnitude. In 2015 IEEE/ACS 12th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA) (pp. 1-6). IEEE.

Communications nationales

1. **Hamidi, M.**, El Haziti, M., JD TIC'14, 19 Juin, 2014. Digital image watermarking for copyright protection.
2. **Hamidi, M.**, El Haziti, M., URAC'15, 28 novembre 2015, Tatouage des images numériques.



BIBLIOGRAPHIE

- AL-HAJ, A. (2007). Combined dwt-dct digital image watermarking. *Journal of computer science*, 3(9):740–746.
- ALI, M., AHN, C. W. et PANT, M. (2014). A robust image watermarking technique using svd and differential evolution in dct domain. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 125(1):428–434.
- ALLIEZ, P., UCELLI, G., GOTSMAN, C. et ATTENE, M. (2008). Recent advances in remeshing of surfaces. *In Shape analysis and structuring*, pages 53–82. Springer.
- ASHOURIAN, M., ENTESHARI, R. et JEON, J. (2004). Digital watermarking of three-dimensional polygonal models in the spherical coordinate system. *In Proceedings Computer Graphics International, 2004.*, pages 590–593. IEEE.
- ASPERT, N., SANTA-CRUZ, D. et EBRAHIMI, T. (2002). Mesh : Measuring errors between surfaces using the hausdorff distance. *In Proceedings. IEEE international conference on multimedia and expo*, volume 1, pages 705–708. IEEE.
- BARNI, M., BARTOLINI, F., CAPPELLINI, V. et PIVA, A. (1998). A dct-domain system for robust image watermarking. *Signal processing*, 66(3):357–372.
- BARNI, M., BARTOLINI, F. et PIVA, A. (2001). Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking. *IEEE transactions on image processing*, 10(5):783–791.
- BENEDENS, O. (1999a). Geometry-based watermarking of 3d models. Rapport technique, FRAUNHOFER INST FOR COMPUTER GRAPHICS DARMSTADT (GERMANY) VIRTUAL REALITY
- BENEDENS, O. (1999b). Two high capacity methods for embedding public watermarks into 3d polygonal models. *In Proceedings of the Multimedia and Security-Workshop at ACM Multimedia*, volume 99, pages 95–99. Orlando, Florida.

- BOGOMJAKOV, A., GOTSMAN, C. et ISENBURG, M. (2008). Distortion-free steganography for polygonal meshes. In *Computer graphics forum*, volume 27, pages 637–642. Wiley Online Library.
- BORS, A. G. (2006). Watermarking mesh-based representations of 3-d objects using local moments. *IEEE Transactions on Image processing*, 15(3):687–701.
- BORS, A. G. et LUO, M. (2012). Optimized 3d watermarking for minimal surface distortion. *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(5):1822–1835.
- BRIASSOULI, A. et STRINTZIS, M. G. (2004). Locally optimum nonlinearities for dct watermark detection. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(12):1604–1617.
- BRODATZ, P. (1966). *Textures : a photographic album for artists and designers*. Dover Pubns.
- CAYRE, F. et MACQ, B. (2003). Data hiding on 3-d triangle meshes. *IEEE Transactions on signal Processing*, 51(4):939–949.
- CAYRE, F., RONDAO-ALFACE, P., SCHMITT, F., MACQ, B. et MAITRE, H. (2003). Application of spectral decomposition to compression and watermarking of 3d triangle mesh geometry. *Signal Processing : Image Communication*, 18(4):309–319.
- CEDILLO-HERNANDEZ, M., GARCIA-UGALDE, F., NAKANO-MIYATAKE, M. et PEREZ-MEANA, H. (2012). Robust digital image watermarking using interest points and dft domain. In *2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pages 715–719. IEEE.
- CHEN, B. et WORNELL, G. W. (2001). Quantization index modulation : A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 47(4):1423–1443.
- CHENG, Y.-M. et WANG, C.-M. (2006). A high-capacity steganographic approach for 3d polygonal meshes. *The Visual Computer*, 22(9-11):845–855.
- CHO, J.-W., PROST, R. et JUNG, H.-Y. (2006). An oblivious watermarking for 3-d polygonal meshes using distribution of vertex norms. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(1):142–155.
- CHO, W.-H., LEE, M.-E., LIM, H. et PARK, S.-Y. (2004). Watermarking technique for authentication of 3-d polygonal meshes. In *International Workshop on Digital Watermarking*, pages 259–270. Springer.

- CHOU, C.-M. et TSENG, D.-C. (2006). A public fragile watermarking scheme for 3d model authentication. *Computer-Aided Design*, 38(11):1154–1165.
- CIGNONI, P., CALLIERI, M., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., GANOVELLI, F. et RANZUGLIA, G. (2008). Meshlab : an open-source mesh processing tool. *In Eurographics Italian chapter conference*, volume 2008, pages 129–136.
- CIGNONI, P., ROCCHINI, C. et SCOPIGNO, R. (1998). Metro : measuring error on simplified surfaces. *In Computer Graphics Forum*, volume 17, pages 167–174. Wiley Online Library.
- COX, I., MILLER, M., BLOOM, J., FRIDRICH, J. et KALKER, T. (2007). *Digital watermarking and steganography*. Morgan kaufmann.
- COX, I. J., KILIAN, J., LEIGHTON, F. T. et SHAMOON, T. (1997). Secure spread spectrum watermarking for multimedia. *IEEE transactions on image processing*, 6(12):1673–1687.
- DAS, C., PANIGRAHI, S., SHARMA, V. K. et MAHAPATRA, K. (2014). A novel blind robust image watermarking in dct domain using inter-block coefficient correlation. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 68(3):244–253.
- DODGSON, N., FLOATER, M. S. et SABIN, M. (2006). *Advances in multiresolution for geometric modelling*. Springer.
- DYSON, F. J. et FALK, H. (1992). Period of a discrete cat mapping. *The American Mathematical Monthly*, 99(7):603–614.
- FENG, L. P., ZHENG, L. B. et CAO, P. (2010). A dwt-dct based blind watermarking algorithm for copyright protection. *In 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, volume 7, pages 455–458. IEEE.
- GAO, X., ZHANG, C., HUANG, Y. et DENG, Z. (2012). A robust high-capacity affine-transformation-invariant scheme for watermarking 3d geometric models. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 8(2S):34.
- GOLUB, G. H. (1996). Cf van loan, matrix computations. *The Johns Hopkins*.
- GUPTA, R., MISHRA, A. et JAIN, S. (2018). A semi-blind hvs based image watermarking scheme using elliptic curve cryptography. *Multimedia Tools and Applications*, 77(15):19235–19260.

- HAMIDI, M., CHETOUANI, A., EL HAZITI, M., EL HASSOUNI, M. et CHERIFI, H. (2019a). Blind robust 3-d mesh watermarking based on mesh saliency and qim quantization for copyright protection. *In Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis*, pages 170–181. Springer.
- HAMIDI, M., CHETOUANI, A., EL HAZITI, M., EL HASSOUNI, M. et CHERIFI, H. (2019b). Blind robust 3d mesh watermarking based on mesh saliency and wavelet transform for copyright protection. *Information*, 10(2):67.
- HAMIDI, M., CHETOUANI, A., EL HAZITI, M., EL HASSOUNI, M. et CHERIFI, H. (2019c). A robust blind 3-d mesh watermarking technique based on scs quantization and mesh saliency for copyright protection. *In International Conference on Mobile, Secure, and Programmable Networking*, pages 211–228. Springer.
- HAMIDI, M., EL HAZITI, M., CHERIFI, H. et ABOUTAJDINE, D. (2015). A blind robust image watermarking approach exploiting the dft magnitude. *In 2015 IEEE/ACS 12th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA)*, pages 1–6. IEEE.
- HAMIDI, M., EL HAZITI, M., CHERIFI, H. et ABOUTAJDINE, D. (2017). A robust blind 3-d mesh watermarking based on wavelet transform for copyright protection. *In 2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, pages 1–6. IEEE.
- HAMIDI, M., EL HAZITI, M., CHERIFI, H. et EL HASSOUNI, M. (2018). Hybrid blind robust image watermarking technique based on dft-dct and arnold transform. *Multimedia Tools and Applications*, 77(20):27181–27214.
- HARTE, T. et BORS, A. G. (2002). Watermarking 3d models. *In Proceedings. International Conference on Image Processing*, volume 3, pages 661–664. IEEE.
- HORN, B. K. P. (1984). Extended gaussian images. *Proceedings of the IEEE*, 72(12):1671–1686.
- HOU, J.-U., KIM, D.-G. et LEE, H.-K. (2017). Blind 3d mesh watermarking for 3d printed model by analyzing layering artifact. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 12(11):2712–2725.
- HSU, C.-T. et WU, J.-L. (1999). Hidden digital watermarks in images. *IEEE Transactions on image processing*, 8(1):58–68.
- JIAN-QIU, J., MIN-YA, D., HU-JUN, B. et QUN-SHENG, P. (2004). Watermarking on 3d mesh based on spherical wavelet transform. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 5(3):251–258.

- KANAI, S., DATE, H., KISHINAMI, T. *et al.* (1998). Digital watermarking for 3d polygons using multiresolution wavelet decomposition. *In Proc. Sixth IFIP WG*, volume 5, pages 296–307.
- KANG, X.-b., ZHAO, F., LIN, G.-f. *et* CHEN, Y.-j. (2018). A novel hybrid of dct and svd in dwt domain for robust and invisible blind image watermarking with optimal embedding strength. *Multimedia Tools and Applications*, 77(11):13197–13224.
- KARYBALI, I. G. *et* BERBERIDIS, K. (2006). Efficient spatial image watermarking via new perceptual masking and blind detection schemes. *IEEE Transactions on Information Forensics and security*, 1(2):256–274.
- KHAYAM, S. A. (2003). The discrete cosine transform (dct) : theory and application. *Michigan State University*, 114.
- KILBURN, D. (1997). Dirty linen, dark secrets. *Adweek Western Edition*, 47(40):35–38.
- KIM, M.-S., VALETTE, S., JUNG, H.-Y. *et* PROST, R. (2005). Watermarking of 3d irregular meshes based on wavelet multiresolution analysis. *In International Workshop on Digital Watermarking*, pages 313–324. Springer.
- KUTTER, M. *et* PETITCOLAS, F. A. (1999). Fair benchmark for image watermarking systems. *In Security and Watermarking of Multimedia Contents*, volume 3657, pages 226–240. International Society for Optics and Photonics.
- KWON, K.-R., KWON, S.-G., LEE, S.-H., KIM, T.-S. *et* LEE, K.-I. (2003). Watermarking for 3d polygonal meshes using normal vector distributions of each patch. *In Proceedings 2003 International Conference on Image Processing (Cat. No. 03CH37429)*, volume 2, pages II–499. IEEE.
- LAVOUE, G., DENIS, F. *et* DUPONT, F. (2007). Subdivision surface watermarking. *Computers & Graphics*, 31(3):480–492.
- LAVOUE, G., GELASCA, E. D., DUPONT, F., BASKURT, A. *et* EBRAHIMI, T. (2006). Perceptually driven 3d distance metrics with application to watermarking. *In Applications of Digital Image Processing XXIX*, volume 6312, page 63120L. International Society for Optics and Photonics.
- LEE, C. H., VARSHNEY, A. *et* JACOBS, D. W. (2005). Mesh saliency. *ACM transactions on graphics (TOG)*, 24(3):659–666.
- LEE, S.-H. *et* KWON, K.-R. (2007). A watermarking for 3d mesh using the patch cegis. *Digital Signal Processing*, 17(2):396–413.

- LEE, S.-H. et KWON, K.-R. (2008). Mesh watermarking based projection onto two convex sets. *Multimedia systems*, 13(5-6):323–330.
- LIN, H.-Y., LIAO, H.-Y., LU, C.-S. et LIN, J.-C. (2005). Fragile watermarking for authenticating 3-d polygonal meshes. *IEEE Transactions on Multimedia*, 7(6):997–1006.
- LIN, S. D., SHIE, S.-C. et GUO, J. Y. (2010). Improving the robustness of det-based image watermarking against jpeg compression. *Computer Standards & Interfaces*, 32(1-2):54–60.
- LIN, W.-H., WANG, Y.-R. et HORNG, S.-J. (2009). A wavelet-tree-based watermarking method using distance vector of binary cluster. *Expert Systems with Applications*, 36(6):9869–9878.
- LIU, L., GUAN, T. et ZHANG, Z. (2013). Broadcast monitoring protocol based on secure watermark embedding. *Computers & Electrical Engineering*, 39(7):2299–2305.
- LIU, Y., PRABHAKARAN, B. et GUO, X. (2008). A robust spectral approach for blind watermarking of manifold surfaces. *In Proceedings of the 10th ACM workshop on Multimedia and security*, pages 43–52. ACM.
- LIU, Y., PRABHAKARAN, B. et GUO, X. (2012). Spectral watermarking for parameterized surfaces. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 7(5):1459–1471.
- LOUNSBERY, M., DEROSE, T. D. et WARREN, J. (1997). Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 16(1):34–73.
- LUO, M. et BORS, A. G. (2008). Principal component analysis of spectral coefficients for mesh watermarking. *In 2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*, pages 441–444. IEEE.
- MABROUK, K. M., SEMARY, N. A. et ABDUL-KADER, H. (2019). Fragile watermarking techniques for 3d model authentication. *In International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications*, pages 669–679. Springer.
- MEDIMEGH, N., BELAID, S., ATRI, M. et WERGI, N. (2018). 3d mesh watermarking using salient points. *Multimedia Tools and Applications*, 77(24):32287–32309.

- MIN, L., TING, L. et YU-JIE, H. (2013). Arnold transform based image scrambling method. *In 3rd International Conference on Multimedia Technology (ICMT-13)*. Atlantis Press.
- MOLAEI, A. M., EBRAHIMNEZHAD, H. et SEDAAGHI, M. H. (2013). A blind fragile watermarking method for 3d models based on geometric properties of triangles. *3D Research*, 4(4):4.
- MUN, S.-M., JANG, H.-U., KIM, D.-G., CHOI, S. et LEE, H.-K. (2015). A robust 3d mesh watermarking scheme against cropping. *In 2015 International Conference on 3D Imaging (IC3D)*, pages 1–6. IEEE.
- MUROTANI, K. et SUGIHARA, K. (2003). Watermarking 3d polygonal meshes using the singular spectrum analysis. *In Mathematics of Surfaces*, pages 85–98. Springer.
- NAKAZAWA, S., KASAHARA, S. et TAKAHASHI, S. (2010). A visually enhanced approach to watermarking 3d models. *In 2010 Sixth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, pages 110–113. IEEE.
- OHBUCHI, . R., MUKAIYAMA, . A. et TAKAHASHI, . S. (2002). A frequency-domain approach to watermarking 3d shapes. *In Computer Graphics Forum*, volume 21, pages 373–382. Wiley Online Library.
- OHBUCHI, R., MASUDA, H. et AONO, M. (1997). Watermaking three-dimensional polygonal models. *In ACM multimedia*, volume 97, pages 261–272. Citeseer.
- OHBUCHI, R., MASUDA, H. et AONO, M. (1998). Data embedding algorithms for geometrical and non-geometrical targets in three-dimensional polygonal models. *Computer Communications*, 21(15):1344–1354.
- O’RUANAIDH, J. J. et PUN, T. (1997). Rotation, scale and translation invariant digital image watermarking. *In Proceedings of International Conference on Image Processing*, volume 1, pages 536–539. IEEE.
- PARK, Y., KANG, H., YAMAGUCHI, K. et KOBAYASHI, K. (2008). Watermarking for tamper detection and recovery. *IEICE Electronics Express*, 5(17):689–696.
- PEREIRA, S. et PUN, T. (2000). Robust template matching for affine resistant image watermarks. *IEEE transactions on image Processing*, 9(6):1123–1129.
- PEYRÉ, G. (2011). The numerical tours of signal processing. *Computing in Science & Engineering*, 13(4):94.

- POLJICAK, A., MANDIC, L. et AGIC, D. (2011). Discrete fourier transform-based watermarking method with an optimal implementation radius. *Journal of Electronic Imaging*, 20(3):033008.
- POTDAR, V. M., HAN, S. et CHANG, E. (2005). A survey of digital image watermarking techniques. In *INDIN'05. 2005 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2005.*, pages 709–716. IEEE.
- PRESS, W. H., FLANNERY, B. P., TEUKOLSKY, S. A. et VETTERLING, W. T. (1989). *Numerical Recipes in Pascal : The Art of Scientific Computing [disc]*. Cambridge University Press.
- QI, X. et XIN, X. (2011). A quantization-based semi-fragile watermarking scheme for image content authentication. *Journal of visual communication and image representation*, 22(2):187–200.
- QIN, C., JI, P., ZHANG, X., DONG, J. et WANG, J. (2017). Fragile image watermarking with pixel-wise recovery based on overlapping embedding strategy. *Signal Processing*, 138:280–293.
- ROLLAND-NEVIERE, X., DOËRR, G. et ALLIEZ, P. (2014). Triangle surface mesh watermarking based on a constrained optimization framework. *IEEE transactions on information forensics and security*, 9(9):1491–1501.
- ROY, S. et PAL, A. K. (2017). A robust blind hybrid image watermarking scheme in rdwt-dct domain using arnold scrambling. *Multimedia Tools and Applications*, 76(3):3577–3616.
- RUANAIDH, J. J. O. et PUN, T. (1998). Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking. *Signal processing*, 66(3):303–317.
- SAHRAEE, M. et GHOFRANI, S. (2013). A robust blind watermarking method using quantization of distance between wavelet coefficients. *Signal, Image and Video Processing*, 7(4):799–807.
- SINGH, A. K. (2017). Improved hybrid algorithm for robust and imperceptible multiple watermarking using digital images. *Multimedia Tools and Applications*, 76(6):8881–8900.
- SINGH, A. K., DAVE, M. et MOHAN, A. (2016). Hybrid technique for robust and imperceptible multiple watermarking using medical images. *Multimedia Tools and Applications*, 75(14):8381–8401.
- SINGH, A. K., KUMAR, B., SINGH, G. et MOHAN, A. (2017a). *Medical image watermarking : techniques and applications*. Springer.

- SINGH, D. et SINGH, S. K. (2017). Dwt-svd and dct based robust and blind watermarking scheme for copyright protection. *Multimedia Tools and Applications*, 76(11):13001–13024.
- SINGH, S., RATHORE, V. S. et SINGH, R. (2017b). Hybrid nsct domain multiple watermarking for medical images. *Multimedia Tools and Applications*, 76(3):3557–3575.
- SINGH, S., RATHORE, V. S., SINGH, R. et SINGH, M. K. (2017c). Hybrid semi-blind image watermarking in redundant wavelet domain. *Multimedia Tools and Applications*, 76(18):19113–19137.
- SOLACHIDIS, V. et PITAS, L. (2001). Circularly symmetric watermark embedding in 2-d dft domain. *IEEE transactions on image processing*, 10(11):1741–1753.
- SON, J., KIM, D., CHOI, H.-Y., JANG, H.-U. et CHOI, S. (2017). Perceptual 3d watermarking using mesh saliency. In *International Conference on Information Science and Applications*, pages 315–322. Springer.
- SONG, R., LIU, Y., MARTIN, R. R. et ROSIN, P. L. (2014). Mesh saliency via spectral processing. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 33(1):6.
- SU, Q. et CHEN, B. (2018). Robust color image watermarking technique in the spatial domain. *Soft Computing*, 22(1):91–106.
- TANAKA, K., NAKAMURA, Y. et MATSUI, K. (1990). Embedding secret information into a dithered multi-level image. In *IEEE Conference on Military Communications*, pages 216–220. IEEE.
- TANG, C.-W. et HANG, H.-M. (2003). A feature-based robust digital image watermarking scheme. *IEEE transactions on signal processing*, 51(4):950–959.
- TAUBIN, G. (1995). Estimating the tensor of curvature of a surface from a polyhedral approximation. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 902–907. IEEE.
- TAUBIN, G. (2000). Geometric signal processing on polygonal meshes.
- THANKI, R., KOTHARI, A. et TRIVEDI, D. (2019). Hybrid and blind watermarking scheme in dcwt-rdwt domain. *Journal of Information Security and Applications*, 46:231–249.
- TIRKEL, A. Z., RANKIN, G., VAN SCHYNDEL, R., HO, W., MEE, N. et OSBORNE, C. F. (1993). Electronic watermark. *Digital Image Computing, Technology and Applications (DICTA '93)*, pages 666–673.

- TSUI, T. K., ZHANG, X.-P. et ANDROUTSOS, D. (2008). Color image watermarking using multidimensional fourier transforms. *IEEE Transactions on Information Forensics and security*, 3(1):16–28.
- UCCHEDDU, F., CORSINI, M. et BARNI, M. (2004). Wavelet-based blind watermarking of 3d models. In *Proceedings of the 2004 workshop on Multimedia and security*, pages 143–154. ACM.
- URVOY, M., GOUDIA, D. et AUTRUSSEAU, F. (2014). Perceptual dft watermarking with improved detection and robustness to geometrical distortions. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 9(7):1108–1119.
- VALETTE, S. et PROST, P. (2004). Wavelet-based multiresolution analysis of irregular surface meshes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(2):113–122.
- VAN SCHYNDEL, R. G., TIRKEL, A. Z. et OSBORNE, C. F. (1994). A digital watermark. In *Proceedings of 1st International Conference on Image Processing*, volume 2, pages 86–90. IEEE.
- VASIC, B. et VASIC, B. (2013). Simplification resilient ldpc-coded sparse-qim watermarking for 3d-meshes. *IEEE Transactions on Multimedia*, 15(7):1532–1542.
- WANG, C.-M. et CHENG, Y.-M. (2005). An efficient information hiding algorithm for polygon models. In *Computer Graphics Forum*, volume 24, pages 591–600. Wiley Online Library.
- WANG, K., LAVOUÉ, G., DENIS, F. et BASKURT, A. (2007). Three-dimensional meshes watermarking : Review and attack-centric investigation. In *International Workshop on Information Hiding*, pages 50–64. Springer.
- WANG, K., LAVOUÉ, G., DENIS, F. et BASKURT, A. (2008a). A comprehensive survey on three-dimensional mesh watermarking. *IEEE Transactions on Multimedia*, 10(8):1513–1527.
- WANG, K., LAVOUÉ, G., DENIS, F. et BASKURT, A. (2008b). Hierarchical watermarking of semiregular meshes based on wavelet transform. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 3(4):620–634.
- WANG, K., LAVOUÉ, G., DENIS, F. et BASKURT, A. (2011). Robust and blind mesh watermarking based on volume moments. *Computers & Graphics*, 35(1):1–19.
- WANG, K., LAVOUÉ, G., DENIS, F., BASKURT, A. et HE, X. (2010). A benchmark for 3d mesh watermarking. In *2010 Shape Modeling International Conference*, pages 231–235. IEEE.

- WANG, K., LUO, M., BORS, A. G. et DENIS, F. (2009). Blind and robust mesh watermarking using manifold harmonics. *In 2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 3657–3660. IEEE.
- WANG, S.-H. et LIN, Y.-P. (2004). Wavelet tree quantization for copyright protection watermarking. *IEEE transactions on Image Processing*, 13(2):154–165.
- WANG, W.-B., ZHENG, G.-Q., YONG, J.-H. et GU, H.-J. (2008c). A numerically stable fragile watermarking scheme for authenticating 3d models. *Computer-Aided Design*, 40(5):634–645.
- WANG, X.-y., LIU, Y.-n., XU, H., WANG, A.-l. et YANG, H.-y. (2016). Blind optimum detector for robust image watermarking in nonsubsampling shearlet domain. *Information Sciences*, 372:634–654.
- WANG, Z., BOVIK, A. C., SHEIKH, H. R., SIMONCELLI, E. P. *et al.* (2004). Image quality assessment : from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4):600–612.
- WEBER, A. G. (1997). The usc-sipi image database version 5. *USC-SIPI Report*, 315:1–24.
- WU, J. et KOBELT, L. (2005). Efficient spectral watermarking of large meshes with orthogonal basis functions. *The Visual Computer*, 21(8-10):848–857.
- XIA, X.-G., BONCELET, C. G. et ARCE, G. R. (1997). A multiresolution watermark for digital images. *In Proceedings of International Conference on Image Processing*, volume 1, pages 548–551. IEEE.
- XIAO, D. et SHIH, F. Y. (2012). An improved hierarchical fragile watermarking scheme using chaotic sequence sorting and subblock post-processing. *Optics Communications*, 285(10-11):2596–2606.
- YEO, B.-L. et YEUNG, M. M. (1999). Watermarking 3d objects for verification. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(1):36–45.
- YU, Z., IP, H. H. et KWOK, L. (2003). A robust watermarking scheme for 3d triangular mesh models. *Pattern recognition*, 36(11):2603–2614.
- ZAFEIRIOU, S., TEFAS, A. et PITAS, I. (2005). Blind robust watermarking schemes for copyright protection of 3d mesh objects. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(5):596–607.

- ZEKI, A. M. et MANAF, A. A. (2009). A novel digital watermarking technique based on isb (intermediate significant bit). *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 50:989–996.
- ZHAN, Y.-z., LI, Y.-t., WANG, X.-y. et QIAN, Y. (2014). A blind watermarking algorithm for 3d mesh models based on vertex curvature. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, 15(5):351–362.
- ZORIN, D. (2000). Subdivision for modeling and animation. *SIGGRAPH2000 course notes*.

Résumé

De nos jours, les contenus multimédia notamment les images 2D et les objets 3D, connaissent une utilisation accrue suite à la puissance des ordinateurs et aux réseaux à haut débit. Par conséquent, ces contenus peuvent être copiés ou modifiés facilement. Pour remédier à ce problème, le tatouage numérique est considéré comme une solution efficace. Il consiste à insérer une marque dans le contenu à protéger. Dans un premier lieu, nous proposons un schéma de tatouage d'images 2D robuste et aveugle dans le domaine hybride (DFT-DCT) en utilisant le cryptage d'Arnold pour renforcer la sécurité du tatouage, assurant à la fois l'imperceptibilité et la robustesse de la marque. Ensuite, nous proposons un tatouage de maillages 3D qui insère la marque par quantification par modulation d'index (QIM) des normes des sommets et la saillance. La méthode proposée assure une bonne imperceptibilité et une robustesse aux attaques géométriques et non-géométriques. Enfin, un tatouage robuste et aveugle de maillages 3D se basant sur la quantification QIM des normes des coefficients d'ondelettes et la saillance de maillages 3D est proposé. Les résultats expérimentaux montrent que cette dernière peut assurer un très bon compromis imperceptibilité-robustesse.

Mots-clefs (7) : Contenu multimédia, tatouage d'images 2D, DFT, DCT, maillages 3D, quantification par modulation d'index (QIM), saillance.

Abstract

Nowadays, multimedia contents especially images and 3D objects have been widely used due to the progress in computer performances and the high speed of network transmission. Consequently, these contents can be copied or modified easily. To overcome this issue, digital watermarking has been found as an efficient solution. It consists of embedding a watermark within the content to protect. We first propose a robust and blind image watermarking scheme in the hybrid domain (DFT-DCT) using Arnold encryption to enhance the watermark security. The proposed method can ensure both high imperceptibility and good robustness. Next, we propose a method that inserts the watermark by quantifying the vertex norms using Quantization Index Modulation (QIM) and 3D mesh saliency. The proposed technique shows high imperceptibility and provides good robustness to a wide range of geometric and non-geometric attacks. Finally, a robust and blind 3D mesh watermarking based on QIM quantization of the wavelet coefficients norms and mesh saliency is proposed. This method can ensure a good tradeoff between imperceptibility and robustness.

Key Words (5) : Multimedia contents, 3D mesh watermarking, quantization index modulation (QIM), wavelet, saliency.