

Tatouage de maillages tridimensionnels basé sur la quantification QIM

Maha HACHANI

Azza Ouled Zaid

Laboratoire Systèmes de Communications

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie

meha.hachani@gmail.com, azza.ouledzaid@isi.rnu.tn

Résumé

Les méthodes de tatouage des images ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. En pratique, il y a un gros déficit dans l'application de ces méthodes dans le domaine des maillages tridimensionnels (3D). Cela est particulièrement dû à l'échantillonnage irrégulier des maillages 3D, ainsi qu'à la complexité des attaques géométriques et topologiques éventuelles sur les maillages tatoués. Ce travail présente une technique de tatouage aveugle et de haute capacité, adapté aux objets tridimensionnels représentés par leur maillage triangulaire surfacique. Notre contribution consiste à appliquer une technique d'insertion basée sur la quantification QIM (Quantization Index Modulation), dans le domaine transformé en ondelettes. La marque est insérée à un niveau de résolution approprié en quantifiant les modules des coefficients d'ondelettes, représentés par leurs coordonnées sphériques. Les résultats de nos tests ont prouvé que la méthode de tatouage proposée offre de bonnes performances, à la fois en termes de capacité, de transparence, et de robustesse contre les attaques géométriques.

Mots clefs

Maillage 3D, Tatouage aveugle, insertion de données cachées, quantification QIM, ondelettes.

1 Introduction

Les techniques numériques de tatouage font depuis une vingtaine d'années l'objet de nombreux travaux de recherche dans des domaines tels que le traitement du signal, la théorie de l'information, et la sécurité. Ces travaux ont jusqu'alors concerné les domaines de l'image, l'audio et la vidéo en raison des volumes importants de ce type de média échangés sur le réseau. L'usage de ces techniques nous semble très prometteur dans les échanges de modèles géométriques 3D appelés à se développer davantage.

Le tatouage des maillages surfaciques 3D a fait l'objet des travaux de recherches en raison de l'usage massif des modèles 3D dans les applications industrielles, médicales et de divertissement [1]. Une application intéressante de ces techniques réside dans l'insertion de données cachées (IDC) ou *data-hiding* permettant d'enrichir le contenu du signal hôte.

Le tatouage de maillages 3D peut être catalogué comme étant robuste, fragile ou de forte capacité, selon les applications visées (respectivement l'authentification, le contrôle d'intégrité et l'enrichissement du contenu hôte). Nous distinguons également les algorithmes de tatouage spatio-temporels et les algorithmes basés sur une transformation, selon le domaine d'insertion de la marque. Les algorithmes de tatouage de maillages 3D, appliqués dans le domaine fréquentiel ou spatio/fréquentiel sont généralement privilégiés car ils offrent une meilleure performance du point de vue robustesse et imperceptibilité [2].

Outre le domaine spectral, la marque peut également être insérée dans le domaine multirésolution du maillage. Ainsi, l'insertion peut être appliquée à différents niveaux de résolution, sélectionnés en fonction de l'application visée.

Le tatouage de maillages 3D, basé sur l'analyse multirésolution a été initié par Kanai *et al.* [3]. Uccheddu *et al.* [4] ont étendu les travaux publiés dans [3] pour garantir une détection aveugle. Dans leurs travaux Wang *et al.* ont proposé un algorithme de tatouage hiérarchique basé sur la transformation en ondelettes, et qui consiste à insérer trois tatouages différents (robuste, de haute capacité et fragile) dans un même maillage [5]. En raison de la limitation du schéma de subdivision introduit par Lounsbery *et al.* [6], ces techniques de tatouage ne s'appliquent que sur des maillages réguliers ou semi-réguliers. Récemment, Kim *et al.* [7] ont utilisé le schéma d'analyse multirésolution des maillages irréguliers, proposé par Valette *et al.* [8], pour développer une méthode de tatouage permettant d'insérer la marque aux coefficients transformés en ondelettes. Malgré sa robustesse à certaines attaques géométriques, cette technique est pénalisée par sa faible capacité d'insertion et une dégradation importante de la qualité du maillage. Plus récemment, Chen *et al.* [2] ont développé une technique de tatouage robuste qui peut être appliquée aux maillages 3D réguliers et irréguliers. Cette technique est basée sur la transformée en ondelettes biorthogonale à l'aide de fonctions B-splines non uniformes. Son originalité réside dans sa capacité à localiser les sommets modifiés et sa robustesse face aux attaques de simplification et de *cropping*. Cependant, elle présente des limites ; telles que l'incapacité à satisfaire la contrainte d'invisibilité et sa faible robustesse à d'autres types d'attaques.

Dans notre travail, nous avons conçu une méthode de tatouage adaptée aux maillages 3D, qui assure une grande capacité d'insertion tout en garantissant un certain niveau de robustesse et d'imperceptibilité. L'algorithme de tatouage développé peut être utilisé dans des applications d'IDC. Le schéma d'insertion proposé s'appuie sur une approche de codage informé basée sur une technique de quantification, appliquée dans le domaine transformé en ondelettes. La marque peut être insérée dans un ou plusieurs niveaux de résolution en considérant les modules des vecteurs des coefficients d'ondelettes comme primitives de tatouage. Ces primitives sont modifiées en utilisant une alternative à la quantification par Modulation d'Index (QIM) [9]. Notre proposition peut être appliquée aux maillages à connectivité quelconque grâce à l'utilisation de l'analyse multirésolution introduit par Valette et Prost [8] qui prend en considération les subdivisions non régulières. D'après l'étude expérimentale sur différents maillages tests, il a été montré que bien qu'étant simple, notre approche de tatouage donne des résultats satisfaisants du point de vue capacité d'insertion, robustesse à diverses attaques géométriques et invisibilité.

Ce papier est organisé comme suit : dans la section 2, nous décrivons, la technique de tatouage adoptée tout en détaillant la phase d'insertion et d'extraction du message à cacher. Les résultats obtenus sont présentés dans la section 3. Enfin, une conclusion ainsi que des perspectives sont établies dans la dernière section 4.

2 Description de la solution proposée

L'objectif de notre travail est l'élaboration d'un algorithme de tatouage aveugle et de haute capacité (H-C) approprié aux maillages triangulaires 3D. Le processus d'insertion est appliqué dans le domaine transformé en ondelettes. La décomposition multirésolution, suite à la projection d'un maillage 3D sur une base d'ondelettes, permet de définir des approximations intermédiaires du modèle original correspondant à différents niveaux de résolution. Cette approche d'analyse multirésolution est un outil mathématique bien adapté à l'utilisation de la transformée en ondelettes dans les applications de tatouage. En effet, la décomposition du maillage original en maillages plus grossiers permet d'analyser les variations fréquentielles sur l'ensemble de la surface. Par conséquent, l'espace d'insertion est simplement choisi en fonction du scénario d'application ciblé. Dans le cadre de notre travail nous avons opté pour une approche d'insertion consistant à modifier les modules des coefficients (vecteurs) d'ondelettes géométriques, localisés au niveau de résolution fixé a priori. La stratégie d'insertion est basée sur la méthode de Quantification par Modulation d'Index, ou QIM (Quantization Index Modulation), effectuée avec un rendement de 1/1 (un bit transmis par coefficient en ondelettes au niveau de détail intermédiaire choisie comme domaine d'insertion). Ainsi, la capacité d'insertion dépend du nombre des coefficients en ondelettes dans cette

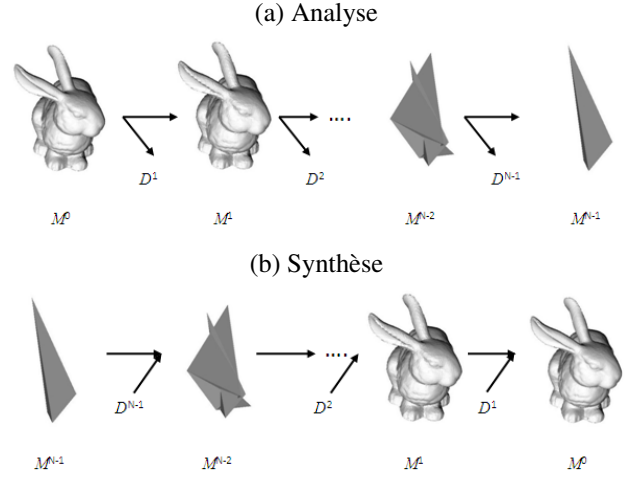


Figure 1 – Principe de l'analyse multirésolution.

approximation.

2.1 Analyse multirésolution par ondelettes

L'analyse multirésolution est une alternative à la simplification séquentielle et à la décomposition spectrale des maillages surfaciques. L'idée principale est de décomposer le maillage original M^0 en deux ensembles à l'aide de filtres d'analyse : un maillage plus grossier M^1 obtenu à l'aide du filtre passe-bas, et un ensemble de détails D^1 , calculés dans un espace transformé à l'aide d'un filtre passe-haut. En appliquant cette procédure de manière itérative sur le maillage grossier (basse résolution) généré lors de l'itération précédente, on obtient une représentation multirésolution du maillage original. Les figures 1a et 1b illustrent respectivement le principe de l'analyse et de la synthèse. En utilisant le formalisme de l'analyse multirésolution, on peut écrire

$$M^j = M^{j+1} \oplus D^{j+1}$$

avec D^{j+1} l'ensemble des détails nécessaires pour construire le maillage M^j de résolution supérieure à partir de M^{j+1} , et \oplus l'opérateur de complément orthogonal. Nous avons également la propriété sur la notion d'espaces imbriqués qui nous permet d'écrire

$$M^{N-1} \subset M^{N-2} \subset \dots \subset M^1 \subset M^0$$

où M^{N-1} le maillage de base, qui a la résolution la plus grossière, et M^0 le maillage original. L'analyse multirésolution, introduit par Valette *et al.* [8] pour les maillages 3D de topologie arbitraire généralise la décomposition en ondelettes des maillages surfaciques, proposée par Lounsbury [6]. La formulation initiale de cette dernière restreint son utilisation aux maillages régulièrement subdivisés. Le maillage original M^0 est d'abord simplifié en fonction du schéma d'analyse par subdivision inverse. Une face peut être subdivisée en 4 faces (le cas 1 :4), en 3 faces, en 2 faces, ou rester inchangée, selon le type d'irrégularité. La

figure 2 montre les 11 cas de subdivisions envisagés par Valette [10] pour une face donnée. Ce schéma de subdivision permet la création, à partir du maillage original M^0 , d'une hiérarchie de maillages de résolution inférieure M^j . Cette hiérarchie représente une approximation du maillage selon plusieurs niveaux de détails, par décomposition des coordonnées des sommets sur une base d'ondelettes. Pour assurer une approximation optimale, Valette a utilisé le procédé de "lifting" [11] lors de la construction du banc de filtres d'analyse et de synthèse.













Face originale	Face subdivisée (inchangée)	Face subdivisée (1:2)	Face subdivisée (1:3)	
	 1			
	Face subdivisée (1:4)			
	 11 (approche Lounsbery)			

Figure 2 – Liste des cas de subdivision possibles. Schéma tiré de [10].

2.2 Stratégie d'insertion de la marque

Le tatouage par quantification QIM peut être vu comme un tatouage avec prise en compte de l'information adjacente. En effet, le signal hôte est modifié de façon à correspondre à un état de quantification, c'est-à-dire à un mot de code, selon le message à insérer. Le quantificateur joue, alors, le rôle d'un dictionnaire structuré, réparti uniformément dans l'espace (mono-dimensionnel pour la quantification scalaire). Le nombre de symboles à insérer correspond au nombre de quantificateurs. Pour chaque symbole de la marque, le quantificateur définit un ensemble d'états de quantification possibles. Dans notre travail, nous ne considérons que deux états de quantification car le message à insérer est formé par des symboles binaires. L'ensemble $D^j = [d_0, d_1, \dots, d_{N-1}]^t$ des coefficients transformés en ondelettes au j^{me} niveau de décomposition sont modifiés lors de la phase d'insertion. Les coordonnées cartésiennes des coefficients $d_i, i \in \{0, \dots, N-1\}$ sont converties en coordonnées sphériques $[r_i, \theta_i, \phi_i]^t$, où, $r_i = \|d_i\|$ désigne le module du coefficient en ondelettes d_i . Nous nous limitons à une marque binaire représentée par une séquence $\mathbf{b} = \{b_0, b_1, \dots, b_i, \dots, b_{N-1}\}$, avec $b_i \in \{0, 1\}$. Une décision binaire est alors effectuée selon la valeur du pas de quantification Δ . Afin de réduire la distorsion introduite par l'insertion de la marque, nous avons utilisé une approche de modélisation simple et efficace permettant d'atténuer l'impact visuel de la quantification QIM sur le

maillage tatoué. La modélisation consiste à appliquer une opération de décalage non linéaire (scaling) des indices de quantification selon un paramètre α fixé a priori. Pour une valeur r_i du module, et son approximation $\tilde{r}_i = \lfloor \frac{r_i}{\Delta} \rfloor \times \Delta$, si on considère l'insertion de $b_i = 0$, la décision binaire aboutit à une nouvelle composante marquée c_0 définie par :

$$\begin{aligned} \text{si } r_i \in [\tilde{r}_i + \alpha, \tilde{r}_i + \frac{\Delta}{2} - \alpha] &\rightarrow c_0 = r_i; \\ \text{si } r_i \in [\tilde{r}_i, \tilde{r}_i + \alpha] &\rightarrow c_0 = \tilde{r}_i + \alpha; \\ \text{si } r_i > \tilde{r}_i + \frac{\Delta}{2} - \alpha &\rightarrow c_0 = \tilde{r}_i + \frac{\Delta}{2} - \alpha; \end{aligned} \quad (1)$$

Autrement, pour $b_i = 1$, la composante c_1 est donnée par :

$$\begin{aligned} \text{si } r_i \in [\tilde{r}_i + \frac{\Delta}{2}, \tilde{r}_i + \frac{\Delta}{2} + \alpha] &\rightarrow c_1 = \tilde{r}_i + \frac{\Delta}{2} + \alpha; \\ \text{si } r_i \in [\tilde{r}_i + \frac{\Delta}{2} + \alpha, \tilde{r}_i + \Delta - \alpha] &\rightarrow c_1 = r_i; \\ \text{si } r_i > \tilde{r}_i + \Delta - \alpha &\rightarrow c_1 = \tilde{r}_i + \Delta - \alpha; \end{aligned} \quad (2)$$

Ce processus d'insertion avec décalage engendre une composante tatouée r'_i fortement corrélé avec r_i . Ce qui contribue efficacement à la réduction de la distorsion due au tatouage.

2.3 Extraction de la marque

L'extraction de la marque se fait en aveugle, à partir du maillage marqué seul. Pour chaque coefficient en ondelettes d_i , localisé au j^{me} niveau de résolution, la norme r'_i est traitée en utilisant l'équation 3 pour obtenir les indices Q^0 et Q^1 .

$$\begin{aligned} Q^0 &= \begin{cases} \lfloor \frac{r'_i}{\Delta} \rfloor & \text{si } r'_i \geq 0 \\ \lfloor \frac{-r'_i}{\Delta} \rfloor & \text{sinon} \end{cases} \\ Q^1 &= \begin{cases} \lfloor \frac{r'_i + \frac{\Delta}{2}}{\Delta} \rfloor & \text{si } r'_i \geq 0 \\ \lfloor \frac{-r'_i - \frac{\Delta}{2}}{\Delta} \rfloor & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

A ce stade, nous mesurons la distance entre r'_i et son approximation :

$$\begin{aligned} \text{si } |r'_i - (Q^1 \times \Delta)| < |r'_i - (Q^0 \times \Delta)| &\rightarrow b_i = 1 \\ \text{sinon} &\rightarrow b_i = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Il est important de souligner que la capacité d'insertion maximale de notre approche de tatouage est égale au nombre de coefficients en ondelettes au j^{me} niveau de décomposition, qui a été choisi comme niveau d'insertion (NI). Toutefois, les coefficients à tatouer peuvent être sélectionnés à l'aide d'une clef privée qui est connue lors de l'insertion et de l'extraction, mais reste secrète pour les autres protagonistes de la chaîne de communication.

Il est démontré que dans le cas du tatouage de maillages 3D, la modification de basse fréquence est à la fois plus imperceptible et plus robuste. D'un autre côté, en allant vers les moyennes et hautes fréquences, le nombre de coefficients d'ondelettes augmente. Dans nos expériences, pour avoir un bon compromis entre la capacité d'insertion, l'invisibilité et la robustesse, nous avons choisi le troisième niveau de résolution ($j = 3$) comme niveau d'insertion.

Tableau 1 – Evaluation de la performance du système de tatouage proposé sur les maillages Venus, Rabbit et Horse. Les performances du tatouage H-C proposé par Wang et al [5] (entre parenthèses) sont mises à titre de comparaison.

	Venus	Rabbit	Horse
NI	3 (4)	3 (4)	3 (4)
NBI _(kbits)	10.909 (7.632)	3.312 (3.18)	5.28 (5.247)
MRMS _(10⁻³)	0.2 (0.22)	0.38 (0.2)	0.4 (0.15)
MSDM	0.04 (0.045)	0.021 (0.039)	0.038 (0.058)
corr	1 (1)	1 (1)	1 (1)

Tableau 2 – Evaluation de la performance du système de tatouage proposé sur les maillages Bunny, Hand et David head. Les performances du tatouage proposé par Kim et al [7] (entre parenthèses) sont mises à titre de comparaison.

	Bunny	Hand	David head
NI	3 (1)	3 (1)	3 (1)
NBI _(kbits)	2.986 (0.265)	3.26 (0.265)	1.374 (0.265)
MRMS _(10⁻³)	0.3 (7)	0.5 (9)	1.4 (24)
MSDM	0.024	0.045	0.078
corr	1 (1)	1 (1)	1 (1)

3 Résultats expérimentaux

Nous avons testé l’algorithme de tatouage proposé sur plusieurs maillages : Venus (100759 sommets), Rabbit (70658 sommets), Horse (112642 sommets), Bunny (34835 vertices), David head (23889 vertices), et Hand (36619 sommets). Nous avons testé plusieurs valeurs du pas de quantification Δ et le paramètre α et nous avons retenu les valeurs 8 (pour Δ) et 0.2 (pour α), qui ont données les meilleurs résultats. Notre choix s’est basé sur le meilleur compromis entre la robustesse du tatouage (face aux attaques géométriques) et la distorsion minimale de la qualité du maillage tatoué. Le nombre de bits insérés (NBI) est égal au nombre de coefficient en ondelettes dans le maillage grossier obtenu après trois décompositions. Afin de mesurer les distorsions introduites par l’insertion, nous utilisons les distances perceptuelle et objective entre le maillage original et le maillage tatoué qui sont mesurées par MSDM (mesh structural distortion measure) et MRMS (maximum root mean square error), respectivement. La robustesse est mesurée par la corrélation normalisée [12] (*corr*) entre le tatouage extrait et le tatouage inséré.

3.1 Evaluation de la distorsion et de la capacité

Les tableaux 1 et 2 donnent l’évaluation de la performance de la technique de tatouage proposée. À partir des résultats

Tableau 3 – Résultats des tests de robustesse face au bruit additif. Les résultats du tatouage robuste proposé par Wang et al [5] (entre parenthèses) sont mis à titre de comparaison.

Modèle	Bruit	corr	MSDM
Venus	0.05 %	0.99 (0.85)	0.097 (0.28)
	0.25 %	0.99 (0.59)	0.108 (0.7)
	0.5 %	0.99 (0.31)	0.119 (0.83)
Rabbit	0.05 %	0.99 (0.92)	0.099 (0.18)
	0.25 %	0.99 (0.59)	0.105 (0.6)
	0.5 %	0.99 (0.31)	0.111 (0.77)
Horse	0.05 %	0.99 (0.69)	0.105 (0.23)
	0.25 %	0.99 (0.5)	0.114 (0.64)
	0.5 %	0.98 (0.08)	0.12 (0.78)

reportés dans ces tableaux, nous pouvons constater que pour tous les maillages testés, notre méthode introduit une distorsion objective relativement élevée alors que la distorsion visuelle est négligeable (la valeur de MSDM est toujours inférieure à 0.078). Ce point est confirmé dans la Figure 3 qui illustre des extraits des trois maillages avant et après avoir été tatoués. Nous ne remarquons presque aucune différence visuelle entre les modèles originaux et leurs versions tatouées. Il est néanmoins important de souligner que les applications basées sur les maillages ont des restrictions très différentes sur les distorsions objectives et perceptuelles introduites par l’insertion du tatouage.

Par exemple, pour les maillages utilisés dans les applications de divertissement, il faut s’assurer que la distorsion visuelle n’est pas détectable par l’œil humain, tandis que la valeur de la distorsion objective n’est pas importante. Dans d’autres applications, telles que la conception assistée par ordinateur et l’imagerie médicale, il est important d’avoir une valeur de la distorsion objective très faible, alors que la qualité visuelle du modèle tatoué peut être relativement moins importante. Une comparaison des mesures : de la taille du message inséré, de la MRMS et de la corrélation, obtenues par notre méthode et celles de deux méthodes de référence (sans considération de la robustesse) est présentée dans les tableaux 1 et 2. Ces deux méthodes de référence sont basées sur la transformée en ondelettes : la méthode de Wang *et al.* [5] (pour les maillages Venus, Rabbit, et Cheval), et la méthode de Kim *et al.* [7] (pour les maillages Bunny, David head, et Hand). Il est à noter que l’algorithme de tatouage proposé par Wang *et al.* [5] s’applique sur des maillages semi-réguliers. D’après les résultats reportés dans les deux tableaux 1 et 2 nous pouvons constater que les performances de notre système de tatouage sont encourageantes et démontrent l’intérêt de l’approche dans un contexte d’insertion de méta-données.

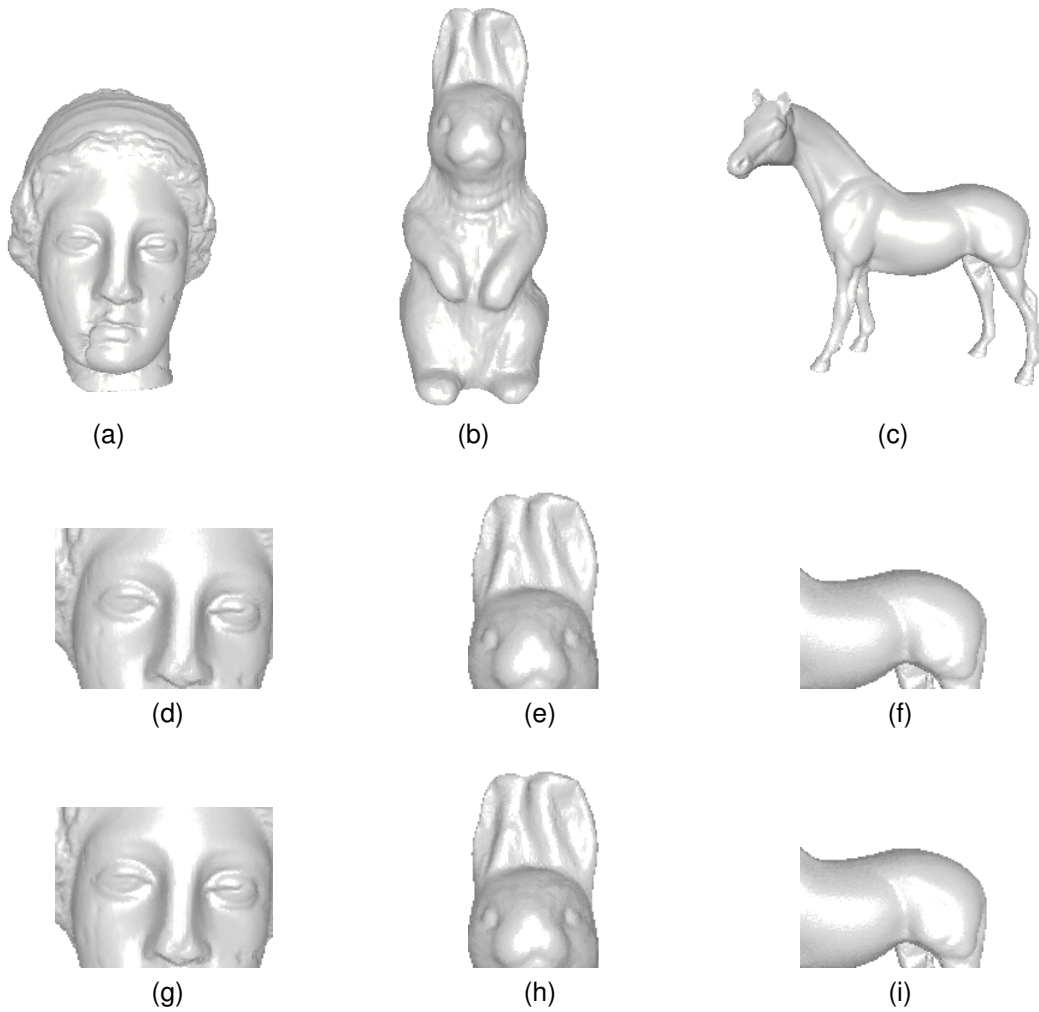


Figure 3 – Trois modèles irréguliers originaux utilisés dans le cadre de nos expériences (a) Venus, (b) Rabbit, et (c) Horse. Extraits des trois modèles irréguliers tatoûés (d)—(f). Les extraits des modèles originaux (g)—(i) sont donnés à titre de comparaison.

3.2 Evaluation de la robustesse

Afin d'évaluer la robustesse du système de tatouage proposé, nous avons attaqué le maillage tatoûé avec un bruit additif aléatoire, un lissage moyen, et une quantification des coordonnées des sommets. Les tableaux 3, 4 et 5 présentent les résultats expérimentaux, où la robustesse est mesurée par la corrélation normalisée entre le tatouage extrait et le tatouage initialement inséré. Les distorsions introduites par les attaques sont également mesurées par MRMS et MSDM. À partir des résultats reportés, le tatouage proposé présente expérimentalement une bonne résistance aux attaques géométriques.

Nous avons comparé les résultats de notre méthode avec ceux du système de tatouage robuste développé de Wang *et al* [13] et qui est basé sur la transformation en harmoniques variétés. Les résultats donnés dans les mêmes tableaux (3, 4 et 5), montrent que les niveaux de robustesse et d'imperceptibilité de notre méthode de tatouage sont nettement

supérieurs à ceux de la méthode de référence. Par ailleurs, on observe que la taille du message inséré par l'algorithme de Wang *et al.* est relativement faible, d'environ 64 bits, ce qui est négligeable par rapport à la capacité d'insertion de notre méthode. Ainsi, notre schéma de tatouage offre un bon compromis entre la robustesse, l'invisibilité et la capacité d'insertion. Toutefois, en raison du problème de synchronisation lié à l'utilisation d'une transformée en ondelettes irrégulières, nous ne considérons pas la résistance aux attaques de connectivité.

4 Conclusions et perspectives

Dans cet article nous avons présenté un système de tatouage aveugle, et de haute capacité, adapté aux maillages 3D réguliers et irréguliers. La stratégie d'insertion est fondée sur la quantification QIM, avec décalage non linéaire, appliquée aux modules des coefficients transformés en ondelettes. D'après l'étude expérimentale sur différents

Tableau 4 – Résultats des tests de robustesse face au lissage moyen. Les résultats du tatouage robuste proposé par Wang et al [13] (entre parenthèses) sont mis à titre de comparaison.

Modèle	Itérations	corr	MSDM
Venus	10	0.99 (0.74)	0.101 (0.15)
	30	0.99 (0.71)	0.117 (0.27)
	50	0.98 (0.62)	0.135 (0.34)
Rabbit	10	0.99 (0.90)	0.08 (0.15)
	30	0.99 (0.71)	0.11 (0.26)
	50	0.99 (0.45)	0.142 (0.31)
Horse	10	0.99 (0.97)	0.092 (0.15)
	30	0.99 (0.5)	0.102 (0.23)
	50	0.99 (0.35)	0.135 (0.28)

maillages 3D, nous avons montré que notre système de tatouage donne des résultats satisfaisants du point de vue compromis capacité, robustesse face aux attaques géométriques, et imperceptibilité.

Les travaux en cours concernent le réordonnement des index des sommets, pour assurer la robustesse contre les changements de connectivité.

Dans une perspective à long terme, nous souhaitons chercher une solution optimale pour sélectionner automatiquement le paramètre de décalage α , de sorte que le meilleur compromis entre la robustesse et l'invisibilité soit atteint.

Références

- [1] K. Wang, G. Lavoué, F. Denis, et A. Baskurt. A Comprehensive Survey on Three-Dimensional Mesh Watermarking. *IEEE Transactions on Multimedia*, 10(8) :1513–1527, December 2008.
- [2] L. Chen, X. Kong, B. Weng, Z. Yao, et R. Pan. A Novel Robust Mesh Watermarking Based on BNBW. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011 :1–69, 2011.
- [3] S. Kanai, D. Date, et T. Kishinami. Digital watermarking for 3d polygon using multiresolution wavelet decomposition. Dans *Sixth IFIP WG 5.2 GEO–6*, pages 296–307, Tokyo, Japan, 1998.
- [4] F. Uccheddu, M. Corsini, et M. Barni. Wavelet based blind watermarking of 3d models. Dans *Workshop on Multimedia and security, ACM Press*, pages 143–154, 2004.
- [5] K. Wang, G. Lavoué, F. Denis, et A. Baskurt. Hierarchical Watermarking of Semiregular Meshes Based on Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 3(4) :620–634, December 2008.

Tableau 5 – Résultats des tests de robustesse face à la quantification des coordonnées. Les résultats du tatouage robuste proposé par Wang et al [13] (entre parenthèses) sont mis à titre de comparaison.

Modèle	Quantification	corr	MSDM
Venus	9-bits	0.99 (0.93)	0.12 (0.49)
	8-bits	0.98 (0.70)	0.26 (0.66)
	7-bits	0.97 (0.63)	0.42 (0.79)
Rabbit	10	0.99 (0.84)	0.09 (0.44)
	30	0.99 (0.59)	0.29 (0.61)
	50	0.98 (0.05)	0.53 (0.76)
Horse	10	0.99 (0.61)	0.11 (0.44)
	30	0.97 (0.25)	0.36 (0.60)
	50	0.97 (0.17)	0.51 (0.73)

- [6] M. Lounsbery, T. D. DeRose, et J. Warren. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type. *ACM Transactions on Graphics*, 16(1) :34–73, 1997.
- [7] M.S. Kim, S. Valette, H.Y. Jung, et R. Prost. Watermarking of 3D irregular meshes based on wavelet multiresolution analysis. Dans *International Workshop on Digital Watermarking (IWDW'05)*, pages 313–324, 2005.
- [8] S. Valette et R. Prost. Multiresolution analysis of irregular surface meshes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10 :113–122, 2004.
- [9] B. Chen et G. W. Wornell. Quantization index modulation, a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 47(4) :1423–1443, 2001.
- [10] S. Valette. *Modèles de maillages déformables 2D et multirésolution surfaciques 3D sur une base d'ondelettes*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- [11] W. Sweldens. The lifting scheme : A custom-design construction of biorthogonal wavelets. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 3(2) :186–200, 1997.
- [12] I.J. Cox, M.L. Miller, J.A. Bloom, J. Fridrich, et T. Kalker. *Digital Watermarking and Steganography*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007.
- [13] K. Wang, M. Luo, A.G Bors, et F. Denis. Blind and robust mesh watermarking using manifold harmonics. Dans *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 3657–3660, 2009.