

# Tatouage hiérarchique et aveugle de maillages tridimensionnels

Kai Wang<sup>1</sup> Guillaume Lavoué<sup>1</sup> Florence Denis<sup>2</sup> Atilla Baskurt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire LIRIS, UMR 5205 CNRS, INSA-Lyon, 69621 Villeurbanne Cedex

<sup>2</sup> Laboratoire LIRIS, UMR 5205 CNRS, Université Lyon 1, 69622 Villeurbanne Cedex

{kwang,glavoue,fdenis,abaskurt}@liris.cnrs.fr

## Résumé

*Cet article présente une méthode originale de tatouage hiérarchique, pour les maillages tridimensionnels semi-réguliers. Grâce à une décomposition en ondelettes, un tatouage robuste aux attaques géométriques et un tatouage de haute capacité sont insérés dans différents niveaux de résolution du maillage en modifiant les normes des coefficients d'ondelettes. Ces deux tatouages sont aveugles et invariants à la transformation de similarité. La robustesse du premier tatouage est obtenue grâce à une synchronisation et une quantification des primitives selon les longueurs des arêtes du niveau le plus grossier, car elles présentent une relative insensibilité aux attaques géométriques. La haute capacité du second tatouage est obtenue en considérant comme primitive la permutation des normes d'un groupe de coefficients. Les résultats expérimentaux valident la forte robustesse géométrique du premier tatouage. A notre connaissance, la capacité du second tatouage, qui peut atteindre le factoriel du nombre de coefficients, est la plus haute dans la littérature pour un maillage 3D.*

## Mots clefs

Maillage tridimensionnel, tatouage numérique, tatouage hiérarchique, aveugle, robustesse, haute capacité.

## 1 Introduction

Le tatouage numérique est considéré comme une solution efficace pour la protection de copyright des divers fichiers multimédias. Cette technique cache une certaine quantité d'information secrète dans la partie utile du fichier à protéger. Comparé avec la cryptographie, le tatouage numérique est capable de protéger les œuvres digitales après la phase de transmission et d'accès légal. Pratiquement, nous distinguons le tatouage aveugle, qui ne nécessite pas le fichier original non-tatoué dans la phase de l'extraction, et le tatouage non-aveugle, qui le nécessite. Evidemment, le tatouage aveugle a une gamme des applications beaucoup plus large par rapport au tatouage non-aveugle.

En infographie, un objet tridimensionnel est souvent représenté par un maillage polygonal, qui est en réalité un ensemble de facettes polygonaux visant à constituer une

bonne approximation de la surface de l'objet 3D. Grâce à l'amélioration de la capacité et de la puissance des ordinateurs personnels et à l'augmentation de la vitesse de transmission des réseaux, l'utilisation des objets 3D est de plus en plus répandue. Ainsi, la protection de la propriété intellectuelle de ceux-ci attire de plus en plus l'attention. Cependant, il existe encore peu de méthodes de tatouage pour les maillages 3D, par comparaison à la maturité relative de la théorie et des pratiques du tatouage des images, du son, et des vidéos. Cette situation est liée aux difficultés dues à la topologie arbitraire et l'échantillonnage irrégulier des maillages 3D, et à la complexité des attaques géométriques et topologiques éventuelles sur les maillages tatoués. Les techniques existantes peuvent être regroupées en deux catégories selon le domaine de l'insertion : soit dans le domaine spatial (en modifiant la géométrie ou la connectivité), soit dans le domaine spectral (en modifiant un certain type de coefficients fréquentiels au sens large).

La plupart des méthodes existantes se situent dans la première catégorie. Les chercheurs essaient d'insérer les tatouages dans différentes primitives spatiales. Celles-ci incluent la distance entre un sommet et le centre de gravité du maillage [1], la direction normale moyenne d'un groupe de facettes [2], la projection d'un sommet sur son arête opposée dans un triangle [3], le rapport entre la hauteur d'un triangle et son arête support [4], la densité locale de triangulation [4], la position relative d'un sommet par rapport à ses voisins [5], *etc.* En règle générale, et à l'exception des méthodes basées sur des descripteurs statistiques de forme [2], [6], [7], ce type de méthodes est assez sensible aux attaques de connectivité, c'est-à-dire la simplification et le remaillage. Afin de combattre cette fragilité aux attaques de connectivité, quelques algorithmes proposent d'effectuer un prétraitement de rééchantillonnage sur le maillage à tester avant l'extraction, mais ce prétraitement rend inévitablement la méthode non-aveugle.

Les algorithmes de la seconde catégorie commencent par décomposer le maillage dans un domaine spectral au sens large, et ensuite insèrent le tatouage dans différentes composantes fréquentielles selon l'application visée [8], [9], [10], [11]. Ces méthodes fournissent généralement une meilleure imperceptibilité et également une meilleure robustesse aux attaques géométriques. Néanmoins, le

problème de la fragilité aux attaques de connectivité existe encore. Par exemple, l'analyse spectrale Laplacienne d'un maillage 3D est sensible aux changements de connectivité [8] ; la décimation itérative des arêtes pour construire une représentation multirésolution dépend également de la connectivité [9] ; de même la plupart des outils d'analyse en ondelettes d'un maillage 3D exigent que le maillage à décomposer soit au moins semi-régulier [10], [11]. A notre connaissance, jusqu'à présent, aucune méthode, basée sur l'analyse en ondelettes, aveugle et robuste aux attaques de connectivité n'a été proposée.

Dans cette étude, une approche originale de tatouage hiérarchique a été développée pour un maillage semi-régulier. Un tatouage robuste et un tatouage de haute capacité coexistent dans le maillage, servant respectivement pour la protection du copyright et pour l'insertion d'information. Cet article est organisé de la façon suivante : la section 2 présente les principes de l'analyse en ondelettes d'un maillage 3D ainsi que la méthode de tatouage hiérarchique proposée ; dans la section 3, nous détaillons l'insertion et l'extraction du tatouage géométriquement robuste ; la section 4 introduit un tatouage dont la capacité augmente rapidement avec le nombre de primitives ; le tatouage hiérarchique est ensuite validé par des résultats expérimentaux dans la section 5 ; finalement, une conclusion et quelques perspectives de travail sont données dans la section 6.

## 2 Tatouage hiérarchique

L'objectif est de construire un algorithme de tatouage hiérarchique robuste et aveugle pour les maillages 3D. Dans la solution envisagée, le maillage à tatouer (probablement irrégulier) est d'abord remaillé pour générer un maillage semi-régulier ayant une forme similaire à celle d'origine. Ensuite, deux tatouages sont insérés dans ce maillage semi-régulier, en modifiant les normes des coefficients obtenus par une analyse en ondelettes. Notons que ce type d'analyse en ondelettes ne s'applique que sur les maillages semi-réguliers, comme montré dans la suite. Pour les mêmes raisons, lors de l'extraction, un maillage semi-régulier avec la même connectivité doit être construit. Ici, le problème de la robustesse aux attaques de connectivité est donc supposé résolu grâce à une technique de remaillage adaptée, et l'on considère des maillages semi-réguliers comme données d'entrée aussi bien du côté de l'insertion que de l'extraction. L'élaboration d'un schéma de remaillage insensible aux changements de connectivité sera l'objet d'une autre étude. Par conséquent, le tatouage d'un maillage semi-régulier, visé par ce papier, est considéré comme un bloc basique du schéma global proposé ci-dessus, et conserve sa généralité. En outre, un maillage semi-régulier présente souvent une distorsion géométrique négligeable par rapport au maillage original, et est bien adapté à la compression grâce à sa connectivité simple [12].

A partir d'un maillage semi-régulier, l'analyse en ondelettes permet d'obtenir un maillage grossier qui représente la forme grossière du maillage (basses fréquences) et une série de coefficients d'ondelettes qui représentent les informations de détails à différents niveaux de résolution (moyennes et hautes fréquences). La formulation mathématique de l'analyse et de la synthèse en ondelettes d'un maillage 3D a été introduite par Lounsbery *et al.* [13]. La figure 1 illustre une itération du mécanisme de décomposition en ondelettes. Un groupe de quatre triangles est fusionné en un seul triangle. Au cours de cette fusion, trois parmi les six anciens sommets sont conservés au niveau supérieur (maillage plus grossier), et les trois autres sont supprimés. Les coefficients d'ondelettes sont calculés comme les erreurs de prédiction pour les sommets supprimés : ce sont des vecteurs tridimensionnels associés à chaque arête du maillage plus grossier. La prédiction la plus simple est le point central des deux sommets ayant été incidents au sommet supprimé.

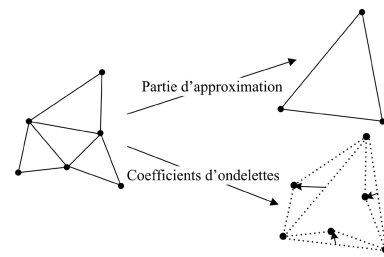


Figure 1 - Exemple de l'analyse en ondelettes d'un maillage semi-régulier.

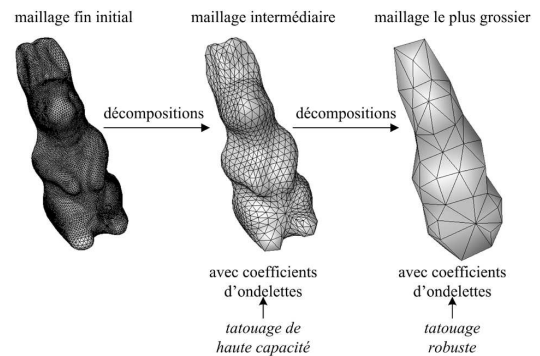


Figure 2 - Tatouage hiérarchique d'un maillage semi-régulier: deux tatouages sont insérés.

L'analyse multirésolution est un outil approprié pour réaliser un tatouage hiérarchique. D'abord, si les différents tatouages sont insérés à des niveaux de résolution différents, il n'existera pas d'interaction entre eux. En plus, chaque tatouage peut être inséré dans le niveau le plus adapté à son fonctionnement. Dans notre méthode, le tatouage robuste est inséré dans le niveau le plus grossier pour la protection de copyright, et le tatouage de haute capacité est inséré dans un niveau plus fin choisi selon la capacité souhaitée, comme illustré sur la figure 2. Puisque la robustesse aux attaques de connectivité est supposée résolue par l'étape de remaillage, il suffit que les

tatouages insérés dans le maillage semi-régulier soient robustes aux attaques géométriques.

### 3 Tatouage Aveugle et Robuste

Un problème critique pour les algorithmes aveugles est leur faible robustesse. En général, le mécanisme de synchronisation est plus fragile que la vraie modulation du tatouage. En effet, à l'extraction, il est difficile de retrouver exactement les positions et les indices des bits de tatouage après des attaques. Dans le cas de maillages 3D, la situation est encore plus difficile, parce qu'il n'existe pas d'indexation naturelle et robuste pour les éléments d'un maillage (sommets, arêtes ou facettes), qui constituent souvent les primitives de tatouage. Notre proposition est d'utiliser des aspects robustes pour localiser et indexer les bits insérés. En pratique, l'ordre des arêtes du niveau le plus grossier, établi selon leurs longueurs, est expérimentalement très robuste face aux attaques géométriques. Les bits de tatouage sont insérés un par un en quantifiant les normes des coefficients d'ondelettes associés aux arêtes ordonnées, selon un principe substitutif. Ainsi, le mécanisme de synchronisation et les primitives de tatouage sont clairement séparés, donc le problème de causalité est évité.

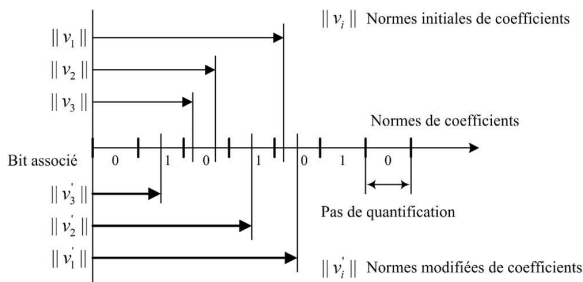


Figure 3 - Exemples de quantification de trois coefficients d'ondelettes pour insérer trois bits '0 1 1'.

Le mécanisme de quantification des normes des coefficients est très simple. L'axe des réels est divisé en sous-intervalles en utilisant un pas de quantification prédéfini, et chaque sous-intervalle est associé à un bit (0 ou 1). Cette attribution pourrait être déterminée par une clé secrète, mais pour des raisons de simplicité, nous adoptons une séquence alternée de 0 et 1 dans les expérimentations. Toutes les normes sont quantifiées au milieu du sous-intervalle associé au bit souhaité le plus proche. Les directions des coefficients sont inchangées. La figure 3 montre trois exemples de quantification pour une séquence à insérer de trois bits '0 1 1' dans les coefficients associés aux trois arêtes les plus longues ;  $\|v_1\|$  est déjà dans un sous-intervalle correct, donc il est simplement transformé en  $\|v'_1\|$  au milieu de ce sous-intervalle ;  $\|v_2\|$  est situé dans un intervalle correspondant à un bit 0, il est donc transformé en  $\|v'_2\|$ , au milieu de l'intervalle associé au bit 1 le plus proche ; de la même façon,  $\|v_3\|$  est transformé en  $\|v'_3\|$  pour insérer un bit 1.

Le pas de quantification est déterminé par la longueur moyenne des arêtes associées. De cette façon, la primitive réelle est le ratio entre la norme d'un coefficient d'ondelette et la longueur moyenne des arêtes du niveau le plus grossier. Cette primitive est invariante à toute transformation de similarité, incluant la translation, la rotation, la mise en échelle uniforme, et la combinaison de ces trois dernières. L'algorithme 1 présente les détails de cette méthode.  $\epsilon_1$  est un paramètre de contrôle permettant de régler le compromis entre la robustesse et l'imperceptibilité. Si le nombre de coefficients est plus grand que le nombre de bits à insérer, une insertion redondante est exercée pour renforcer la robustesse. Avec la connaissance du paramètre  $\epsilon_1$ , qui peut être transmis comme une clé secrète, l'extraction est très simple et aveugle. Il s'agit de rétablir l'ordre des arêtes, de calculer le pas de quantification, et finalement de retrouver les bits désignés par chaque coefficient.

#### Algorithme 1: Insertion du tatouage robuste et aveugle

1. Effectuer l'analyse ondelettes jusqu'au niveau le plus grossier
  2. Trier les arêtes par ordre décroissant de longueur
  3. Calculer la longueur moyenne  $l_{mo}$  de ces arêtes et fixer la valeur du pas de quantification à  $l_{mo}/\epsilon_1$
- Répéter pour chaque arête dans l'ordre décroissant
4. Calculer la norme de son coefficient d'ondelette associé
  5. Quantifier cette norme selon le bit de tatouage à insérer en utilisant le mécanisme décrit ci-dessus
- Fin de la répétition
6. Reconstruire le maillage semi-régulier le plus fin avec les coefficients d'ondelettes modifiés

### 4 Tatouage de Haute Capacité

Dans certains cas, un tatouage de haute capacité est nécessaire, pour cacher une information longue telle que la description d'un fichier multimédia, l'information du patient dans le cas de données médicales, etc. Dans la littérature, la capacité la plus haute est à peu près 1 bit par triangle [4], [14]. Cette section introduit un nouveau schéma de tatouage avec une capacité plus élevée (Tatouage de Haute Capacité basé sur la Permutation, THCP), le tatouage n'étant plus inséré bit par bit, mais d'une façon globale.

Pour un maillage grossier se situant à un niveau de résolution donné d'une décomposition en ondelettes, nous supposons que ses  $n$  coefficients d'ondelettes sont indexés en utilisant les longueurs des arêtes associées, de manière similaire à la section précédente. Par exemple, le coefficient indexé par  $i$  est associé à la  $i^{\text{ème}}$  arête la plus longue. Ensuite, à chaque coefficient est associée une valeur  $ordre_o(i)$ , correspondant à l'ordre de sa norme parmi tous les coefficients d'ondelettes du même niveau. La séquence  $ordre_o(1), ordre_o(2), \dots, ordre_o(n)$  est donc une permutation complète des  $n$  nombres entiers variant de 1 à  $n$ , et par conséquent possède  $n!$  possibilités d'ordres différents. Chaque permutation peut donc représenter un tatouage de  $\lfloor \log_2 n! \rfloor$  bits, où  $\lfloor x \rfloor$  est une fonction

qui donne le plus grand entier inférieur ou égal à  $x$  (donc en pratique certaines permutations n'ont pas de tatouage correspondant). Il apparaît donc naturel de modifier cet ordre original par une nouvelle permutation afin d'insérer un tatouage de  $\text{floor}(\log_2 n!)$  bits. En fait, pour atteindre une meilleure imperceptibilité, au lieu des normes elles-mêmes, nous ordonnons et modifions les restes des divisions entières des normes par un paramètre de contrôle  $p$ . De la même manière que pour le tatouage robuste (voir section précédente), ce paramètre de contrôle est déterminé par la longueur moyenne des arêtes associées, mais à un niveau différent ( $p = l_{mo} / \varepsilon_2$ ). La norme modifiée est déterminée par l'équation (1), où  $\text{ordre}(i)$  est l'ordre souhaité de la nouvelle norme du coefficient associé avec la  $i^{\text{ème}}$  arête. Le tableau 1 présente un exemple d'insertion du tatouage pour un cas simple de 4 arêtes, où  $p = 1$ . La correspondance entre les permutations et les séquences de tatouage va être expliquée dans la suite.

$$\|v_i\| = \text{floor}\left(\frac{\|v_i\|}{p}\right) * p + \frac{\text{ordre}(i) * p}{(n+1)} \quad (1)$$

Tableau 1 - Insertion du tatouage de haute capacité.

Longueurs des arêtes	12	10	9.2	8.5
Ordre arêtes / indices coefs. ( $i$ )	1	2	3	4
Normes des coefs.	2.3	1.5	1.8	2.1
Restes des normes modulo $p$	0.3	0.5	0.8	0.1
Ordre coefs. original ( $\text{ordre}_o(i)$ )	2	3	4	1
Ordre souhaité ( $\text{ordre}(i)$ )	1	4	3	2
Restes modifiés	0.2	0.8	0.6	0.4
Normes modifiées	2.2	1.8	1.6	2.4

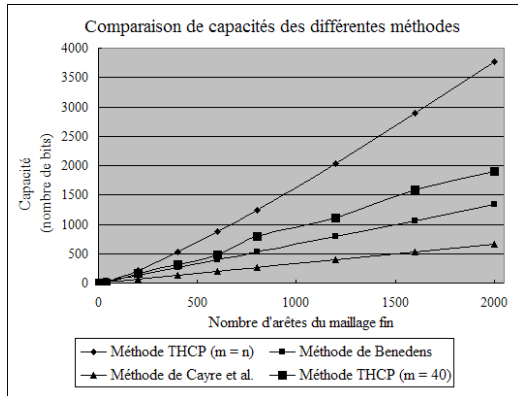


Figure 4 - Comparaison de la capacité de la méthode THCP avec les différentes méthodes de l'état de l'art.

En pratique, les  $n$  arêtes sont divisées en plusieurs groupes de  $m$  arêtes (et  $\text{floor}(\log_2 m!)$  bits sont insérés dans chaque groupe) afin de rendre le tatouage moins fragile et d'éviter les erreurs de calcul de nombres flottants. Ainsi la capacité réelle de cette méthode est de  $\text{floor}(n/m) * \text{floor}(\log_2 m!)$  bits. La figure 4 compare graphiquement les capacités des différentes méthodes de haute capacité de l'état de l'art (sur le point particulier de la capacité, sans aucune considération en d'autres termes, comme la robustesse et la sûreté) : la méthode de Cayre *et al.* [3] (1 bit/sommet), la méthode de Benedens [14] (1 bit/triangle), et la méthode THCP ( $m = n$  et  $m = 40$ ). La

méthode d'Ohbuchi *et al.* [4] ( $\approx 1.2$  bits/triangle), n'est pas représentée sur la figure, mais coïncide presque avec la courbe de la méthode de Benedens. Il est supposé que pour un maillage triangulaire et manifold, nous avons approximativement  $e = 1.5f$  et  $f \approx 2v$ , où  $v$ ,  $e$ , et  $f$  sont les nombres de sommets, arêtes, et facettes du maillage, respectivement. Notons que pour la méthode THCP, nous tatouons le maillage fin ( $e$  arêtes) en quantifiant les coefficients d'ondelettes du maillage du niveau supérieur obtenu après une décomposition ( $e/4$  arêtes).

Une correspondance entre les tatouages (séquences de bits) et les ordres possibles des normes (permutations) doit être établie. La règle basique adoptée est que pour deux permutations, celle avec un premier chiffre (de gauche) plus grand représente une séquence de bits plus grande. Et si le premier chiffre est le même, nous comparons le deuxième, et ainsi de suite. Avec cette règle, la permutation 1, 2, 3, ...,  $n-1$ ,  $n$  représente la séquence de bits la plus petite 0, 0, ..., 0, 0, et la permutation 1, 2, 3, ...,  $n$ ,  $n-1$  désigne la séquence 0, 0, ..., 0, 1.

Si le paramètre de contrôle  $p$  est égal au pas de quantification de la section 3, la distorsion de la norme, dans le pire des cas, est presque la même pour les deux algorithmes. Cependant, la méthode THCP repose sur l'ordre relatif des différents coefficients, donc une légère attaque géométrique d'amplitude inférieure à  $p$  pourrait altérer cet ordre et éliminer le tatouage.

## 5 Résultats Expérimentaux

Nous avons testé l'algorithme de tatouage hiérarchique sur plusieurs objets. Le tatouage robuste est inséré avant le tatouage de haute capacité afin de ne pas influencer l'ordre des arêtes utilisé par ce dernier. Le temps d'exécution varie selon la complexité du maillage. Pour le maillage de lapin illustré par la figure 5.a possédant 70K sommets, la procédure d'insertion est accomplie en moins de 10 secondes sur un ordinateur portable équipé d'un processeur mobile de 1.7 GHz et d'un RAM de 512 MB.

La figure 5.b représente le maillage de lapin tatoué ainsi qu'un zoom sur le nez et le cou. Le paramètre  $\varepsilon_1$  est fixé à 35, et un tatouage robuste de 64 bits est inséré avec un taux de répétition  $c = 3$  dans le maillage grossier de 207 arêtes obtenu après cinq décompositions. Le tatouage de haute capacité est inséré dans le maillage de niveau 4 possédant 828 arêtes. En prenant  $m = 40$ , 3.2K bits sont insérés. Le paramètre  $\varepsilon_2$  est fixé à 25. Il n'existe pas de distorsion visible entre le maillage initial et le maillage tatoué, et la distance moyenne normalisée entre ces deux maillages est très faible ( $D_{L1} = 0.003013$ ).

Afin de tester les robustesses de ces deux tatouages, nous avons attaqué le maillage tatoué avec un bruit additif aléatoire, un lissage moyen, un rehaussement, et une quantification des coordonnées des sommets. La figure 6 illustre quatre exemples de maillages attaqués, et le tableau 2 présente les résultats expérimentaux, où la robustesse est mesurée par deux indicateurs : le taux de

bits erronés (BER : Bit Error Rate) et la corrélation entre le tatouage extrait et le tatouage inséré. Les intensités des bruits additifs sont normalisées par rapport à la distance moyenne des sommets au centre du maillage. La conclusion est que le tatouage robuste est capable de résister aux attaques géométriques avec une intensité assez forte. Le tatouage de haute capacité est invariant à la transformation de similarité, mais reste fragile aux attaques géométriques fortes. La raison principale est donnée à la fin de la section 4.

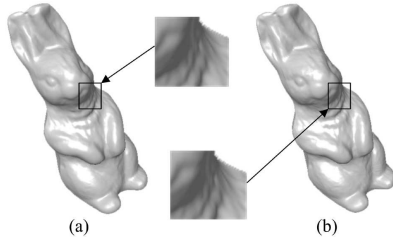


Figure 5 - Exemple de tatouage hiérarchique: (a) le maillage de lapin semi-régulier; (b) le maillage tatoué.

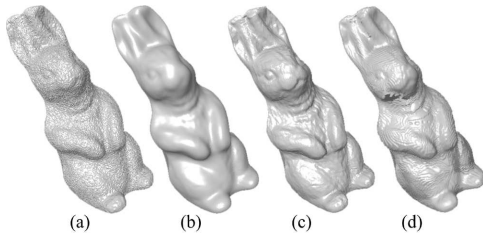


Figure 6 - Quatre maillages attaqués: (a) 0.40% de bruit additif; (b) 6 lissages moyens; (c) rehaussement; (d) quantification (7 bits) des coordonnées des sommets.

Tableau 2 - Résultats des tests de robustesse.

Attaques	Tatouage robuste		Tatouage de haute capacité
	BER	Corrélation	
Trans. similarité	0	1	Existe
0.01% bruit	0	1	Existe
0.25% bruit	0.046875	0.901319*	Perdu
0.40% bruit	0.109375	0.769015	Perdu
6 lissages moyens	0.03125	0.933333	Perdu
Rehaussement	0.0625	0.866667	Perdu
8-bit quantification	0.03125	0.933333	Perdu
7-bit quantification	0.17875	0.630608	Perdu

\* 0.92 pour la méthode non-aveugle de Yu *et al.* [1].

## 6 Conclusion et Perspectives

Dans cet article, nous avons proposé un nouvel algorithme de tatouage hiérarchique aveugle pour un maillage semi-régulier, qui repose sur la modification des normes de coefficients d'ondelettes. Les deux tatouages proposés sont aveugles et invariants à la transformation de similarité. L'utilisation d'un aspect robuste (l'ordre des arêtes du niveau le plus grossier établi selon leurs longueurs) pour la synchronisation, et la séparation du mécanisme de synchronisation des primitives de tatouage semblent de bonnes pistes pour élaborer un algorithme aveugle et robuste. De plus, malgré la fragilité relative du

tatouage de haute capacité, celui-ci peut s'avérer très pertinent pour des applications de stéganographie et d'étiquetage. Les travaux en cours concernent l'amélioration du tatouage robuste afin de résister à la coupe, et l'étude de techniques de remaillage insensibles aux changements de connectivité. L'amélioration de la robustesse du tatouage de haute capacité, et la prise en compte des propriétés géométriques locales du maillage pour le tatouage méritent aussi une étude approfondie. En fin, nous voulons remarquer que la sûreté est le défaut principal de nos méthodes : une analyse simple d'histogramme permet de révéler le pas de quantification, et par là effacer à moindre distorsion les messages cachés. Nous envisageons, pour résoudre ce défaut, d'améliorer le mécanisme de quantification (*e.g.* élaborer un mécanisme qui conserve les statistiques originales de l'histogramme).

## Remerciements

Les auteurs voudraient remercier Céline Roudet pour ses aides au long de cette étude. Ce travail est partiellement soutenu par 'Chinese Scholarship Council' du gouvernement chinois ainsi que par la région Rhône-Alpes (Cluster ISLE, projet SYSECUR).

## Références

- [1] Z. Yu, H.H.S. Ip, et L.F. Kwok, A Robust watermarking scheme for 3D triangular mesh models, *Pattern Recognition*. 36(11): 2603-2614, 2003.
- [2] O. Benedens, Geometry-based watermarking of 3D models, *IEEE Computer Graphics and Applications*. 19(1): 46-55, 1999.
- [3] F. Cayre, et B. Macq, Data hiding on 3-D triangle meshes, *IEEE Trans. on Signal Processing*. 51(4): 939-949, 2003.
- [4] R. Ohbuchi, H. Masuda, et M. Aono, Data embedding algorithms for geometrical and non-geometrical targets in three-dimensional polygonal models, *Computer Communications*. 21(15): 1344-1354, 1998.
- [5] A. G. Bors, Watermarking mesh-based representations of 3-D objects using local moments, *IEEE Trans. on Image Processing*. 15(3): 687-701, 2006.
- [6] S. Zafeiriou, A. Tefas, et I. Pitas, Blind robust watermarking schemes for copyright protection of 3D mesh objects, *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*. 11(5): 596-607, 2005.
- [7] J. W. Cho, R. Prost, et H. Y. Jung, An oblivious watermarking for 3-D polygonal meshes using distribution of vertex norms, *IEEE Trans. on Signal Processing*. 55(1): 142-155, 2007.
- [8] R. Ohbuchi, A. Mukaiyama, et S. Takahashi, A frequency-domain approach to watermarking 3D shapes, *Computer Graphics Forum*. 21(3): 373-382, 2002.
- [9] E. Praun, H. Hoppe, et A. Finkelstein, Robust mesh watermarking, Dans *Acte de ACM SIGGRAPH Conference '99*, pp. 49-56, 1999.
- [10] S. Kanai, H. Date, et T. Kishinami, Digital watermarking for 3D polygons using multiresolution wavelet decomposition, Dans *Acte de International Workshop on Geometric Modeling '98*, pp. 296-307, 1998.
- [11] F. Uccheddu, M. Corsini, et M. Barni, Wavelet-based blind watermarking of 3D models, Dans *Acte de ACM Multimedia and Security Workshop '04*, pp. 143-154, 2004.
- [12] A. Khodakovsky, P. Schroder, et W. Sweldens, Progressive geometry compression, Dans *Acte de ACM SIGGRAPH Conference '00*, pp. 271-278, 2000.
- [13] M. Lounsbery, T.D. DeRose, et J. Warren, Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type, *ACM Trans. on Graphics*. 16(1): 34-73, 1997.
- [14] O. Benedens, Two high capacity methods for embedding public watermarks into 3D polygonal models, Dans *Acte de ACM Multimedia and Security Workshop '99*, pp. 95-99, 1999.