

Académie de Montpellier  
Université Montpellier II  
Sciences et Techniques du Languedoc

**MÉMOIRE DE STAGE DE  
MASTER 2 RECHERCHE**

effectué au LIRMM (Laboratoire d'Informatique de Robotique  
et de Micro-électronique de Montpellier)

Spécialité : **IFPRU (Informatique à Finalité Professionnelle et Recherche  
Unifiées)**

**ANALYSE MULTIRÉSOLUTION D'OBJETS 3D  
EN VUE D'UN TATOUAGE ROBUSTE**

par **ALI BEDDIAF**

Soutenu le **21 juin 2010**

Sous la direction de :  
**WILLIAM PUECH**  
**NANCY RODRIGUEZ**



## Remerciements

Je tiens à remercier mes professeurs : William PUECH et Nancy RODRIGUEZ pour leur disponibilité, leur confiance, leur encadrement.

Parfaitement intégré au sein de l'équipe ICAR/LIRMM, ce stage s'est déroulé dans une ambiance studieuse, sérieuse, chaleureuse et cordiale.

L'aide et le suivi continu de Nicolas TOURNIER, Benoit RANGE, m'ont permis de progresser et d'avancer durant cette période.

Je n'oublie pas de remercier nidhal BOURAOUI, Dalila GOUDIA, Azhar HADMI et toute personne qui m'ont aidé de près ou de loin.

Enfin, je remercie pour leur soutien mes proches : parents, amis, ...



## Résumé

Dans ce mémoire de master recherche, nous abordons une problématique concernant le tatouage d'objets 3D. Il s'agit d'une extension des techniques de tatouage d'image 2D. Cet axe de recherche a été traité au début par des méthodes classiques spatiales, qui travaillent beaucoup plus sur la partie géométrie des objets 3D, or des travaux récents se focalisent sur la partie topologie[APDP10], ou sur d'autres techniques qui travaillent plutôt sur le domaine fréquentiel et particulièrement à base d'ondelettes.

## Abstract

In this research report of master degree, we tackle the issue concerning the 3D objects watermarking. It's an extension of old technics of 2D image watermarking. This research field is treated at first by classical spatial based approaches, which work much more on the geometry part of 3D objects, whereas a recent works focus on the topology part[APDP10], or on another methods that work rather in spectral domain, and particulary wavelets-based.



# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>9</b>
<b>1 Introduction au tatouage</b>	<b>13</b>
1.1 Introduction . . . . .	13
1.2 Stéganographie, cryptographie, et tatouage . . . . .	13
1.2.1 La stéganographie . . . . .	13
1.2.2 Le tatouage . . . . .	13
1.2.3 La cryptographie . . . . .	14
1.3 Schéma de tatouage . . . . .	14
1.3.1 Schéma global d'insertion du tatouage . . . . .	14
1.3.2 Schéma global d'extraction du tatouage . . . . .	15
1.4 Types de synchronisations . . . . .	15
1.5 Attaques . . . . .	16
1.5.1 Définition . . . . .	16
1.5.2 Formes . . . . .	16
1.6 Critères d'évaluation . . . . .	16
1.6.1 Robustesse : . . . . .	16
1.6.2 Capacité : . . . . .	16
1.6.3 Imperceptibilité : . . . . .	17
1.7 Types de tatouages . . . . .	17
1.7.1 Le tatouage robuste . . . . .	17
1.7.2 Le tatouage fragile . . . . .	17
1.7.3 Le tatouage hybride : robuste et fragile . . . . .	18
1.8 Conclusion . . . . .	18
<b>2 Etat de l'art des méthodes de tatouage d'objets 3D</b>	<b>19</b>
2.1 Domaines de tatouage d'objets 3D . . . . .	19
2.2 Méthodes de tatouage d'objets 3D basé ondelettes . . . . .	19
2.2.1 Méthodes non-aveugles . . . . .	19
2.2.1.1 Méthode de KANAI <i>et al.</i> . . . . .	19
2.2.2 Méthodes aveugles . . . . .	21
2.2.2.1 Méthode aveugle et robuste de WANG <i>et al.</i> . . . . .	21
2.2.2.2 Méthode de Haute Capacité basée sur la Permutation (THCP)	
23	
2.3 Conclusion . . . . .	24

---

<b>3 Analyse multirésolution et ondelettes</b>	<b>25</b>
3.1 Introduction . . . . .	25
3.2 Applications . . . . .	25
3.3 Types de maillages . . . . .	25
3.3.1 Maillage irrégulier . . . . .	25
3.3.2 Maillage régulier . . . . .	26
3.3.3 Maillage semi-régulier . . . . .	26
3.4 La transformation en maillage semi-régulier . . . . .	27
3.4.1 La méthode MAPS (Multiresolution Analysis Parametrization of Surfaces) . . . . .	27
3.4.2 La méthode SWARPS (Shrink Wrapping Approach to Remeshing Polygonal Surfaces) . . . . .	27
3.4.3 La méthode de Igor GUSKOV (Manifold-based Approach to Semi-regular Remeshing) . . . . .	27
3.5 Les ondelettes . . . . .	27
3.5.1 Les ondelettes de Haar . . . . .	27
3.5.2 Les bancs de filtres . . . . .	29
3.5.3 Transformée en ondelettes par le schéma lifting . . . . .	29
3.6 Les méthodes de subdivision comme des filtres pour l'analyse/synthèse par ondelettes des maillages 3D . . . . .	29
3.6.1 Définition : . . . . .	29
3.6.2 Exemples de méthodes de subdivision . . . . .	30
3.6.2.1 Subdivision loop . . . . .	30
3.6.2.2 Subdivision Butterfly . . . . .	31
3.6.2.3 Le triangle moyen . . . . .	31
3.7 Fonctionnement de la transformée en ondelettes par le schéma lifting . . . . .	32
3.7.1 La transformée directe du schéma lifting . . . . .	32
3.7.2 La transformée inverse du schéma lifting : . . . . .	33
3.8 Le schéma lifting pour un maillage semi-régulier . . . . .	35
3.9 Conclusion : . . . . .	35
<b>4 Mise en œuvre du tatouage multirésolution</b>	<b>37</b>
4.1 Introduction . . . . .	37
4.2 La transformation en semi-régulier . . . . .	37
4.3 La transformée en ondelettes . . . . .	38
4.4 Le tatouage hiérarchique basé ondelettes (méthode WANG <i>et al.</i> ) . . . . .	38
4.5 Résultats expérimentaux . . . . .	39
4.6 Analyse . . . . .	42
4.7 Proposition . . . . .	42
4.8 Conclusion . . . . .	43
<b>Conclusion générale</b>	<b>43</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>48</b>

---

# Table des figures

1.1	Schéma général d'un système de cryptographie n'assure pas la protection du média après le décryptage, contre des réutilisations personnelles . . . . .	14
1.2	Schéma global d'insertion du tatouage . . . . .	14
1.3	Schéma global d'extraction du tatouage . . . . .	15
1.4	Types d'arrangements : global, local, et indexé . . . . .	16
1.5	Représentation graphique des 3 critères essentiels d'un tatouage . . . . .	17
2.1	Schéma d'insertion . . . . .	20
2.2	Schéma d'extraction . . . . .	20
2.3	Analyse en ondelettes d'un maillage 3D semi-régulier. . . . .	22
2.4	Exemples de quantification de trois coefficients d'ondelettes pour insérer trois bits '0 1 1'[WLDB07]. . . . .	22
2.5	Exemple de l'application du tatouage THCP [WLDB07] . . . . .	24
3.1	Exemple d'un maillage irrégulier . . . . .	26
3.2	Exemple d'un maillage régulier . . . . .	26
3.3	Exemple d'un maillage semi-régulier . . . . .	26
3.4	Modèle 3D de la statue david : à gauche : le maillage irrégulier, à droite : le maillage semi-régulier . . . . .	28
3.5	Les fonctions ondelettes et échelle de Haar . . . . .	28
3.6	Banc de filtres . . . . .	29
3.7	Masque de la subdivision loop . . . . .	31
3.8	Masque de la subdivision Butterfly . . . . .	32
3.9	Exemple d'une surface subdivisée par la subdivision Butterfly . . . . .	32
3.10	Masque de la subdivision du triangle moyen . . . . .	33
3.11	Transformée directe du schéma lifting . . . . .	33
3.12	Transformée inverse du schéma lifting . . . . .	34
3.13	Exemple du schéma lifting d'un signal unidimensionnel . . . . .	34
3.14	Schéma lifting pour un maillage semi-régulier . . . . .	35
3.15	Schéma lifting à J étages . . . . .	36
3.16	Suite de maillages à plusieurs niveaux de détails . . . . .	36
4.1	Maillage multirésolution du fandisk . . . . .	38
4.2	Graphe des courbes : BER et désynchronisation (tatouage hiérarchique) . .	40
4.3	Graphe des courbes : BER et désynchronisation (tatouage au 1 <sup>er</sup> niveau) .	40
4.4	Graphe des courbes : BER et désynchronisation (tatouage au 2 <sup>me</sup> niveau) .	41
4.5	Graphe des courbes : BER et désynchronisation (tatouage au 3 <sup>me</sup> niveau) .	41
4.6	Tri hiérarchique des arêtes d'un maillage semi-régulier . . . . .	42



# Introduction générale

La protection des droits d'auteurs devient de plus en plus une contrainte majeure aussi bien pour les éditeurs que pour les auteurs, et les types de vols de propriétés d'auteurs deviennent plus complexes. Pour ces raisons, et pour pouvoir protéger les travaux scientifiques, il faut recourir aux techniques de tatouage (digital watermarking) qui eux-même, font partie des techniques de dissimulation d'information (data hiding).

Dans le premier chapitre, on commence par une introduction au tatouage au sens large, puis dans le deuxième chapitre, on établit un état de l'art sur quelques méthodes de tatouage d'objets 3D. Dans le troisième chapitre, on illustre l'analyse multirésolution et les ondelettes, et finalement on présente dans le quatrième chapitre, une mise en œuvre du tatouage multirésolution.



# Chapitre 1

## Introduction au tatouage

### 1.1 Introduction

Le tatouage est une technique qui sert, entre autre, à la protection des droits d'auteurs, et à la transmission sécurisée de données. Elle consiste à l'insertion des informations cachées dans la partie utile d'un fichier. Ce fichier tatoué peut subir une opération de transmission pour être reçu par le récepteur, qui va essayer d'extraire les informations cachées (soit en se basant sur le fichier original ou non, le tatouage s'appelle, tatouage non aveugle, ou tatouage aveugle). En infographie, les scènes se représentent souvent par un maillage polygonal, donc les tatouages seront insérés dans différentes primitives spatiales. Celles-ci incluent la distance entre un sommet et le centre de gravité du maillage, la direction normale moyenne d'un groupe de facettes, la projection d'un sommet sur son arête opposée dans un triangle, le rapport entre la hauteur d'un triangle et son arête support.

### 1.2 Stéganographie, cryptographie, et tatouage

#### 1.2.1 La stéganographie

Ce terme correspond au terme anglais steganography. Elle vise à dissimuler l'existence même du message transmis. Ainsi, un observateur quelconque ne doit pas pouvoir dire si un médium donné contient un message caché ou non. La problématique a été formalisée sous le nom de "problème des prisonniers". Le contenu porteur n'est pas nécessairement fixé au départ, car il n'a aucune importance ; il peut même être construit spécialement en fonction du message qu'il va dissimuler.

#### 1.2.2 Le tatouage

Ce terme correspond au terme anglais watermarking. Il vise à insérer le message dans un document porteur donné. Ce document n'est pas anodin (comme le cas précédent), il a une valeur (scientifique, commerciale, ...) qu'il faut protéger. En général, on demande au tatouage de ne pas perturber l'utilisation normale du document. Dans le contexte de la protection des droits d'auteur, on souhaite que le tatouage reste détectable tant que le document conserve de la valeur, ce qui le rapproche d'un filigrane (on peut penser à l'analogie avec les billets de banque) .

---

### 1.2.3 La cryptographie

Ce terme correspond au terme anglais cryptography. La cryptographie est la méthode la plus répandue pour protéger des contenus numériques ; science largement développée, cependant elle ne permet pas, en revanche, de contrôler comment un utilisateur utilise le contenu numérique après son décryptage. C'est le tatouage qui permet de protéger un contenu même après que celui-ci soit décrypté (FIGURE 1.1).

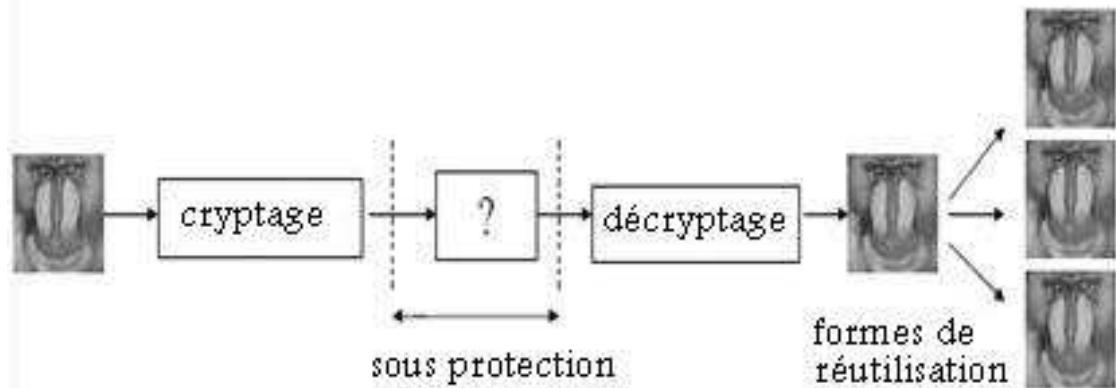


FIGURE 1.1 – Schéma général d'un système de cryptographie n'assure pas la protection du média après le décryptage, contre des réutilisations personnelles

## 1.3 Schéma de tatouage

Tout tatouage comprend un schéma d'insertion et un autre d'extraction

### 1.3.1 Schéma global d'insertion du tatouage

Il consiste en l'insertion d'un message caché appelé marque, dans la partie utile d'une donnée, selon un algorithme d'insertion, ce qui donne lieu à une donnée tatouée. Cette dernière passe après par une phase de distribution ou de transmission (FIGURE 1.2).

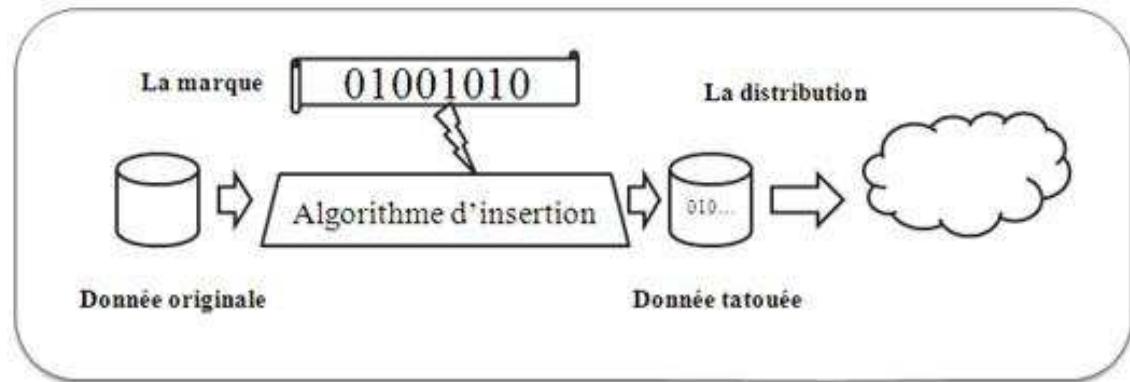


FIGURE 1.2 – Schéma global d'insertion du tatouage

### 1.3.2 Schéma global d'extraction du tatouage

A la réception, la donnée tatouée subit à un algorithme d'extraction pour en extraire la marque qu'elle cache. Il est à noter que les algorithmes d'extraction peuvent nécessiter la donnée originale ou non, donc on parle d'un tatouage non aveugle ou aveugle respectivement (FIGURE 1.3).

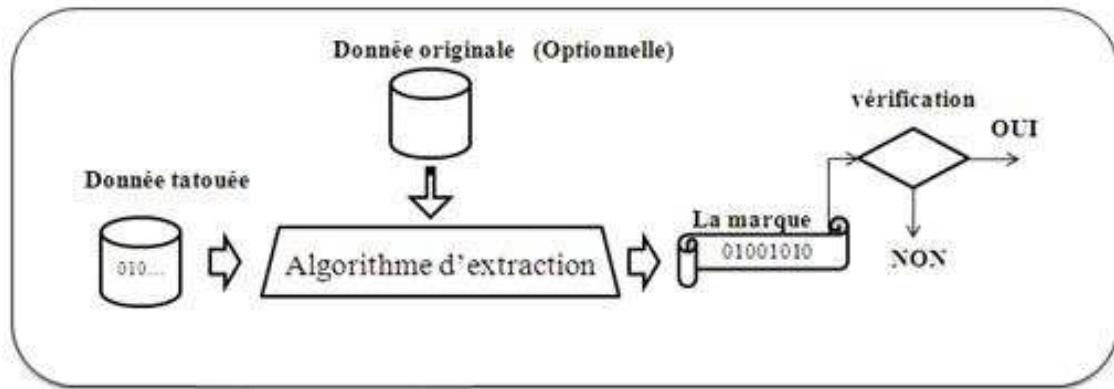


FIGURE 1.3 – Schéma global d'extraction du tatouage

### 1.4 Types de synchronisations

Pour que le récepteur puisse extraire la marque cachée correctement, les bits du tatouage doivent être insérés dans une séquence bien définie. Cette séquence est appelée synchronisation ou arrangement. On distingue trois types de synchronisations :

1. Soit on utilise un parcours systématique du graphe de connexité, l'arrangement est dit global (FIGURE 1.4),
2. Soit on utilise un parcours de chacune des sous-parties du maillage, l'arrangement est dit local (FIGURE 1.4),
3. Soit on explicite en plus de la marque, son numéro de séquence (index), l'arrangement est dit indexé (FIGURE 1.4).

**Arrangement du maillage 3D** En 3D, 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. L'information cachée est alors codée en modifiant des invariants géométriques. L'ordre des arêtes du niveau le plus grossier, établi selon leurs longueurs, est expérimentalement un invariant très robuste face aux attaques géométriques. Les invariants seront choisis en fonctions des transformations qu'ils vont subir, on peut trouver, entre autre :

- Des invariants à la rotation et la translation : longueur, aire et volume
- Des invariants à des transformées affines (combinaison linéaire des transformations : translation, rotation, et/ou mise en échelle) : le rapport des longueurs, des aires et des volumes.
- Des invariants à la projection perspective : le birapport de 4 points alignés.

Pour la modification des positions ou l'ordre des sommets, il n'existe pas d'invariants (à part la valence), donc ils seront une source de bruit rendant le tatouage vulnérable.

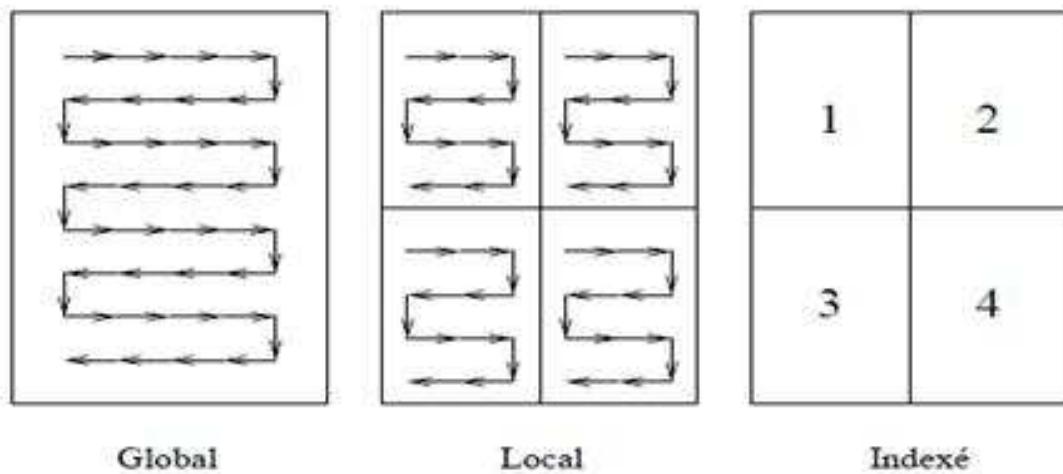


FIGURE 1.4 – Types d’arrangements : global, local, et indexé

## 1.5 Attaques

### 1.5.1 Définition

Une attaque réfère à toute opération de transformation ou de transcodage que peut subir une donnée tatouée, provoquant une perte du tatouage.

### 1.5.2 Formes

Ceci comprend, entre autre les opérations de :

- compression,
- rehaussement/lissage,
- transformation géométrique,
- conversion analogique/numérique,
- simplification et remaillage (attaques de connectivité)
- ...

On distingue deux types d’attaques, celles passives et celles actives. Les premières visent simplement à déceler la présence d’un tatouage invisible caché dans l’image. Les secondes attaques cherchent à éliminer cette marque.

## 1.6 Critères d’évaluation

Une méthode de tatouage peut être évaluée sur plusieurs critères, mais les trois critères communs et essentiels à toute approche de tatouage sont les suivants

### 1.6.1 Robustesse :

C’est la capacité d’un tatouage de résister aux différentes formes d’attaques

### 1.6.2 Capacité :

C’est le nombre maximum de bits qu’une méthode de tatouage puisse insérer.

### 1.6.3 Imperceptibilité :

C'est la non faculté de distinguer la donnée originale de celle tatouée par le système visuel humain (SVH).

On peut rajouter aussi comme critère :

- La complexité, qui dépend de la nature algorithmique du tatouage, et de l'existence de contraintes de type temps réel.
- La sûreté, au sens du principe de Kerckhoff [Ker83].

En pratique, pour une méthode de tatouage, il est difficile de remplir au maximum les trois critères, en même temps, et un compromis doit être trouvé selon l'application visée (FIGURE 1.5).

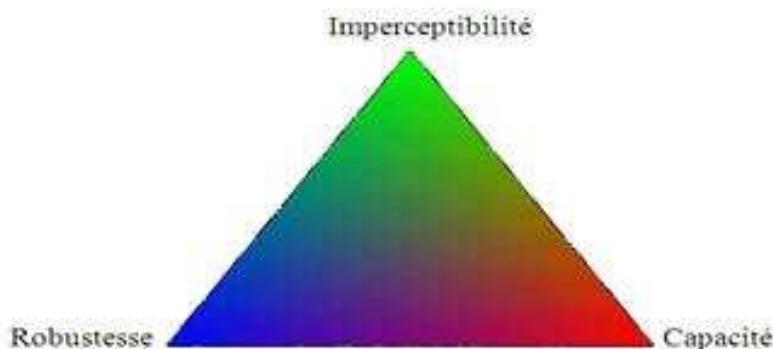


FIGURE 1.5 – Représentation graphique des 3 critères essentiels d'un tatouage

## 1.7 Types de tatouages

### 1.7.1 Le tatouage robuste

Dans le contexte de la protection des droits d'auteur, on souhaite que le tatouage reste détectable tant que le document conserve de la valeur : on parle alors de tatouage robuste car il doit résister à de nombreux traitements. On peut le définir comme l'opération qui consiste à cacher un signal, appelé marque, dans un signal hôte en respectant les contraintes de perceptibilité. Dans ce cas, il faut pouvoir garantir que l'information insérée puisse résister à des transformations (licites et/ou illicites) et donc ne pas être effacée sans altérer de façon perceptible le signal hôte. Toute la question est alors de savoir à quelle manipulation on souhaite que le tatouage résiste.

### 1.7.2 Le tatouage fragile

Le tatouage disparaît dès que le document subit des modifications : on parle alors de tatouage fragile, et c'est la présence du filigrane qui garantit l'intégrité. On utilise un tatouage fragile lorsque l'on souhaite pouvoir détecter si le document a subi des transformations, c'est à dire tester son intégrité d'un point de vue perceptif.

Les domaines d'application sont, par exemple, les photos d'identité (cartes d'identité, passeport, permis de conduire), les images médicales (scanner, IRM, ...) ou encore militaires.

Le tatouage fragile est dit évolué lorsque la dégradation provoquée par la compression, une transformation géométrique ou encore un filtrage, n'altère pas le tatouage, mais que l'ajout ou l'effacement d'un objet l'altèrent suffisamment pour être détectés. En effet, selon le contexte applicatif, on peut souhaiter soit détecter tout type de modification, soit un ensemble donné de transformations (interdites). On peut par exemple autoriser certains taux de compression, des changements d'échelle, ... Donc on a :

- Des techniques de tatouage fragile : le tatouage disparaît à la moindre manipulation
- Des techniques de tatouage semi-fragile : le tatouage résiste aux manipulations autorisées.
- Des techniques de tatouage semi-robuste : lorsque l'information cachée contient des descriptions de propriétés importantes du document, comme par exemple les contours des éléments essentiels d'une image

Le principe est donc que si on arrive à détecter le tatouage, c'est que le document peut être considéré comme intégrer.

### 1.7.3 Le tatouage hybride : robuste et fragile

Certains articles proposent des schémas incluant une technique de tatouage robuste, pour la protection du droit d'auteur par exemple, et une méthode d'authentification par tatouage fragile [DVP03].

## 1.8 Conclusion

Après cette introduction assez générale, on essaiera dans le prochain chapitre, d'établir un état de l'art sur les méthodes de tatouage d'objet 3D, ceci en mettant l'accent sur celles basées ondelettes.

## Chapitre 2

# Etat de l'art des méthodes de tatouage d'objets 3D

### 2.1 Domaines de tatouage d'objets 3D

Les méthodes de tatouage des objets 3D se regroupent en 2 catégories, suivant si elles travaillent sur le domaine spatial, ou le domaine spectral :

- Domaine spatial : ici le tatouage est inséré dans différentes primitives spatiales. Celles-ci incluent la distance entre un sommet et le centre de gravité du maillage [ZY03], la direction normale moyenne d'un groupe de facettes [Ben99], la projection d'un sommet sur son arête opposée dans un triangle [ME04], le rapport entre la hauteur d'un triangle et son arête support [OMA98], la densité locale de triangulation [OMA98], la position relative d'un sommet par rapport à ses voisins [Bor06], etc.
- Domaine fréquentiel : dans ce cas, les algorithmes de tatouage commencent par décomposer le maillage dans un domaine fréquentiel au sens large, et ensuite ils insèrent le tatouage dans différentes composantes fréquentielles selon l'application visée [OMT02], [PF99], [KDKD98], [UCB04]. Ces méthodes fournissent généralement une meilleure imperceptibilité et également une meilleure robustesse aux attaques géométriques, dont l'analyse en ondelettes de maillage 3D, fait partie [KDKD98].

Mon travail s'est concentré sur l'analyse en ondelettes

### 2.2 Méthodes de tatouage d'objets 3D basé ondelettes

#### 2.2.1 Méthodes non-aveugles

Cette classe de méthodes a comme condition commune ; qui est la présence du modèle original non tatoué durant le processus d'extraction de la marque

##### 2.2.1.1 Méthode de KANAI *et al.*

###### Schéma d'insertion

- Application de la transformée en ondelettes sur un maillage semi-régulier.
  - Modification des coefficients d'ondelettes par la marque à insérer.
  - Reconstitution du maillage tatoué par la transformée en ondelette inverse à partir des coefficients d'ondelettes modifiés (FIGURE 2.1).
-

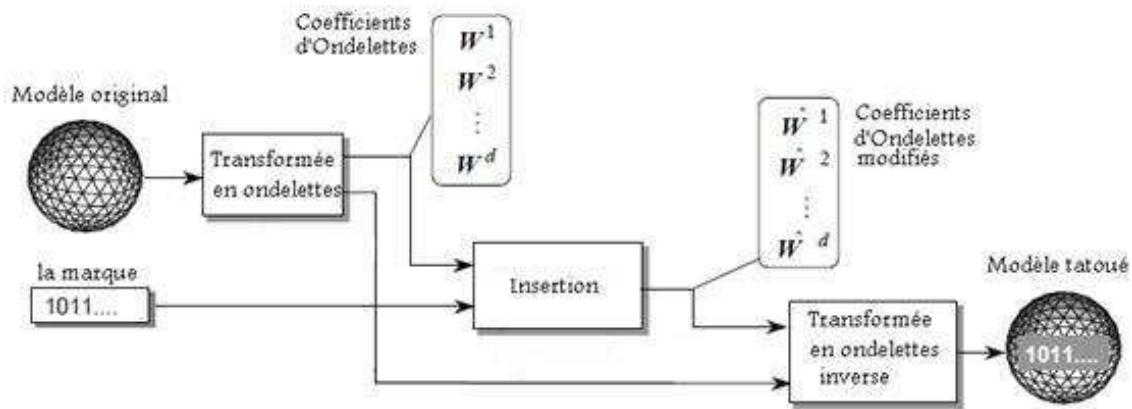


FIGURE 2.1 – Schéma d'insertion

### Schéma d'extraction

- Application de la transformée en ondelettes sur le maillage originale et tatoué.
- La marque extraite sera la différence entre les coefficients originaux et modifiés (FIGURE 2.2).

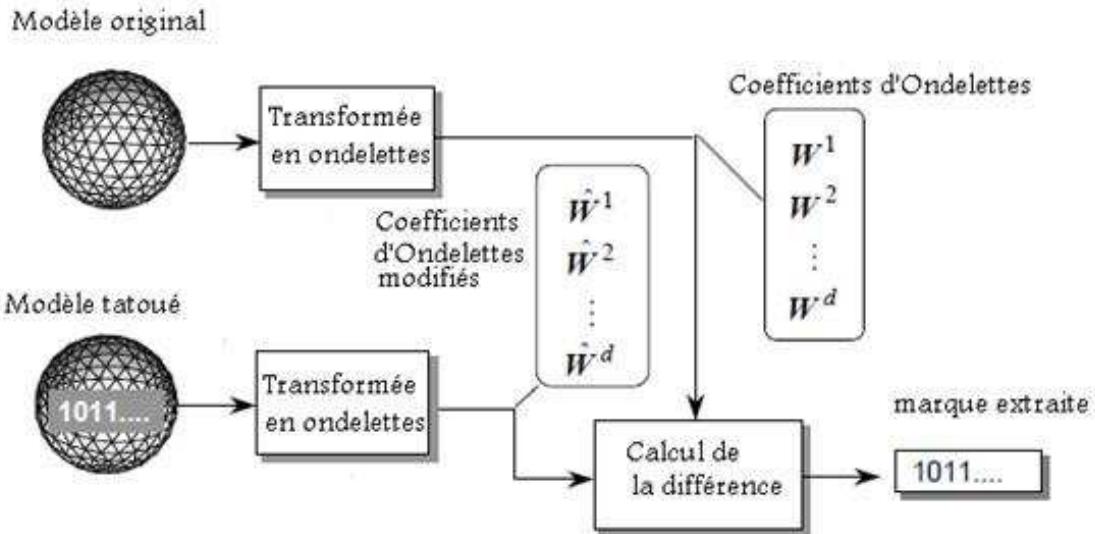


FIGURE 2.2 – Schéma d'extraction

### Les caractéristiques

- Le marquage à la basse résolution présente une robustesse contre les transformations géométriques affines. L'invariant choisi est le suivant :

$$\alpha_i^j = |W_i^j|/l_i^j$$

- Bon choix des régions où on va faire l'insertion, parce que les normes des coefficients d'ondelettes donnent une information sur les régions planes ou bosselées. Le SVH est

insensible aux modifications légères aux régions bosselées, donc on sélectionne parmi tous les coefficients ceux dont la norme est supérieure à un seuil de sensibilité du SVH.

$$|W_i^j| > \delta_1$$

- Possibilité de l'insertion hiérarchique de la marque, et ceci à chaque niveau de résolution.
- Contrôle de l'erreur géométrique : Quand on utilise la transformée en ondelettes, la relation géométrique entre l'erreur maximale  $\Delta_{max}$  aux sommets, et la limite supérieure du changement des coefficients d'ondelette  $\delta_2$ , peut être défini comme suite :

$$\Delta_{max} = \frac{d+1}{2} \delta_2$$

Donc pour conserver un degré tolérance  $\epsilon$ , la limite supérieure du changement des coefficients sera définie comme suite :

$$\delta_2 \leq \frac{2\epsilon}{d+1}$$

#### **Les inconvénients :**

- Application restreinte à une classe topologique de maillage (semi-régulier).
- Temps de calcul élevé.
- Génération des erreurs géométriques.

#### **Contournement de ces lacunes :**

- Existence d'une méthode de remaillage rendant le maillage semi-régulier.
- Non obligation d'un tatouage temps réel pour un maillage 3D, contrairement au tatouage des vidéos.
- Pour l'erreur, on peut la contrôler par un algorithme qui la supprime à un certain niveau de tolérance.

### **2.2.2 Méthodes aveugles**

#### **2.2.2.1 Méthode aveugle et robuste de WANG *et al.***

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 (hautes fréquence) à différents niveaux de résolution. Dans l'exemple ci-dessous (FIGURE 2.3), les coefficients d'ondelettes représentent des vecteurs tridimensionnels de déplacement des centres d'arêtes, estimant les erreurs de prédictions des sommets supprimés associés au maillage grossier [WLDB07].

**Mécanisme de synchronisation** C'est l'ordre décroissant des arêtes selon leur longueur.

**Algorithme de tatouage** Les bits de tatouage sont insérés un par un en quantifiant les normes des coefficients d'ondelettes associés aux arêtes (précédemment triées en ordre décroissant). On quantifie les normes des coefficients d'ondelettes, selon un pas de quantification qui est le rapport entre la longueur moyenne des arêtes et un paramètre de contrôle

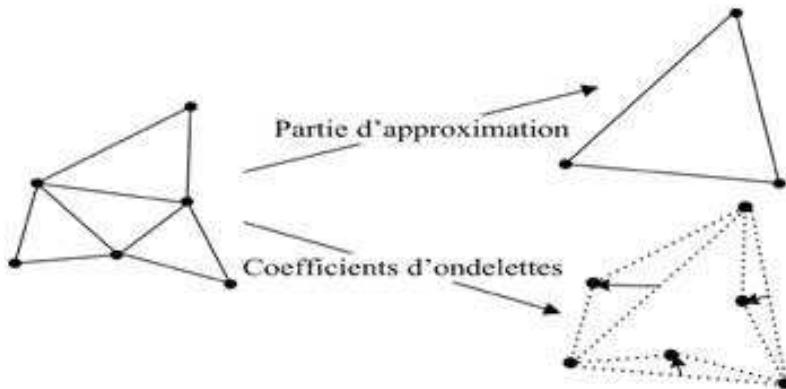


FIGURE 2.3 – Analyse en ondelettes d'un maillage 3D semi-régulier.

$\epsilon_1$ .

$$pas = l_{moy}/\epsilon_1$$

Cette quantification permet d'associer à chaque sous-intervalle des normes, un bit 0 puis 1 en alternance (par exemple). A partir delà, l'insertion des bits de tatouage se fait en changeant les normes vers le milieu de l'intervalle le plus proche correspondant au bit qu'on souhaite insérer (FIGURE 2.4).

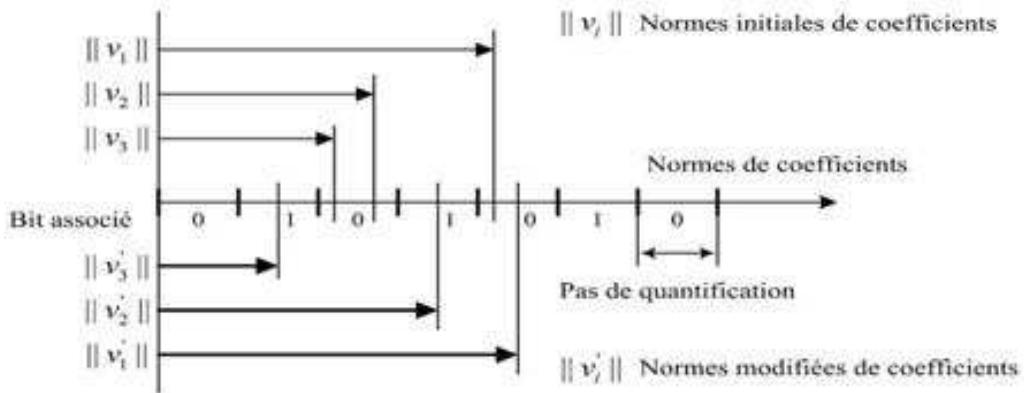


FIGURE 2.4 – Exemples de quantification de trois coefficients d'ondelettes pour insérer trois bits '0 1 1'[WLDB07].

La primitive de tatouage ici est le rapport entre la norme du coefficient d'ondelettes et le pas de quantification (qui dépend de la longueur moyenne des arêtes)

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.

$\epsilon_1$  est un paramètre de contrôle permettant de régler le compromis entre la robustesse et l'imperceptibilité.

Donc un grand  $\epsilon_1$  donne lieu à un pas de quantification petit, une imperceptibilité meilleure, et une faible robustesse, et inversement.

**Schéma d'insertion** L'algorithme suivant présente les étapes de l'insertion du tatouage.

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

**Schéma d'extraction** L'algorithme suivant présente les étapes de l'extraction du tatouage.

- Effectuer l'analyse ondelettes jusqu'au niveau le plus grossier.
- Trier les arêtes par ordre décroissant de longueur.
- Calculer la longueur moyenne de ces arêtes et fixer la valeur du pas de quantification.
- Répéter pour chaque arête dans l'ordre décroissant.
- Calculer la norme de son coefficient d'ondelettes associé.
- Retrouver le bit associé à ce coefficient selon la quantification de la norme de ce dernier.
- Fin de la répétition.
- Constitution du message par la concaténation séquentielle des bits extraits.

### 2.2.2.2 Méthode de Haute Capacité basée sur la Permutation (THCP)

Le tatouage de haute capacité [WLDB07] s'avère indispensable, pour cacher une information longue telle que la description des fichiers multimédia, l'information du patient dans le cas de données médicales, etc.

**Mécanisme de synchronisation** 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 (ces derniers qui sont triés par ordre décroissant de leurs longueurs). Donc, le coefficient indexé par i est associé à la ième arête la plus longue. Ensuite, à chaque coefficient est associée une valeur  $ordre0(i)$ , correspondant à l'ordre de sa norme parmi tous les coefficients d'ondelettes du même niveau. Donc pour pour n coefficients, on a la séquence  $ordre0(1), ordre0(2), \dots, ordre0(n)$ .

**Algorithme de tatouage** En fait, ici les bits de tatouage ne sont pas insérés localement sous forme de quantification de la norme de chaque coefficient d'ondelette comme dans méthode précédente, mais d'une façon globale, sous forme de tous les ordres possibles (permutations) des n coefficients.

Donc, pour n coefficients, on aura  $n!$  possibilités d'ordres différents, par conséquent, la capacité peut atteindre  $floor(log_2 n!)$  bits [WLDB07].

$floor(x)$  : est une fonction d'arrondissement d'un nombre réel, en le plus grand nombre entier qui est inférieur ou égal à x.

**Schéma d'insertion** Pour réordonner ces coefficients sans perdre l'imperceptibilité, la méthode ne réordonne plus leurs normes, mais les restes de divisions entières des normes par un paramètre de contrôle P [WLDB07], selon la formule suivante :

$$\|V'_i\| = \text{floor}\left(\frac{\|V_i\|}{p}\right) * p + \frac{\text{ordre}(i)*p}{(n+1)}$$

Il est visible que la capacité de ce tatouage ( $\text{floor}(\log_2 n!)$ ) dépend proportionnellement du nombre d'arêtes n. Donc pour atteindre une capacité extrême, on doit l'appliquer au niveau le plus fin.

En plus, ce tatouage ne fait aucune supposition sur la robustesse, ainsi une légère attaque géométrique d'amplitude inférieure à P pourrait altérer l'ordre des coefficients et éliminer le tatouage.

La figure FIGURE 2.5 montre un exemple de l'application de cette méthode :

<b>Longueurs des arêtes</b>	12	10	9.2	8.5
<b>Ordre arêtes / indices coefs. (i)</b>	1	2	3	4
<b>Normes des coefs.</b>	2.3	1.5	1.8	2.1
<b>Restes des normes modulo p</b>	0.3	0.5	0.8	0.1
<b>Ordre coefs. original (<math>\text{ordre}_0(i)</math>)</b>	2	3	4	1
<b>Ordre souhaité (<math>\text{ordre}(i)</math>)</b>	1	4	3	2
<b>Restes modifiés</b>	0.2	0.8	0.6	0.4
<b>Normes modifiées</b>	2.2	1.8	1.6	2.4

FIGURE 2.5 – Exemple de l'application du tatouage THCP [WLDB07]

**Schéma d'extraction** A l'extraction, il suffit de retrouver la permutation des coefficients d'ondelettes en se basant toujours sur l'ordre décroissant des arêtes associés à ces coefficients.

### 2.3 Conclusion

La méthode de tatouage robuste et aveugle de WANG *et al.*, semble la plus intéressante, du fait qu'elle est moins complexe que l'ancienne méthode de KANAI *et al.*, en plus d'être aveugle. Cependant du fait que le tatouage se fait d'une façon globale sur tous les coefficients d'ondelettes, l'imperceptibilité devient médiocre.

## Chapitre 3

# Analyse multirésolution et ondelettes

### 3.1 Introduction

L'analyse multirésolution, comme elle est formulée par Mallat [Mal89], fournit un outil convenable par lequel on construit des filtres d'analyse et de synthèse. Elle a été bien définie pour les courbes Bspline, par Chui[Chu92], puis Lounsberg [LDW94] l'a généralisée pour les surfaces de topologie arbitraire. L'analyse multirésolution permet la visualisation d'un même objet sur plusieurs résolutions en jouant sur le niveau de détail ce qui facilite entre autre l'édition de formes complexe en agissant sur le niveau grossier puis on le fait propager jusqu'au niveau le plus fin. Par une phase de subdivision suivie d'une phase de synthèse, la connectivité du maillage au niveau fin est déduite à partir du maillage au niveau grossier, et ceci grâce à l'analyse en ondelettes. A noter que le maillage original doit avoir une topologie particulière, pour cela une phase de remaillage s'avère nécessaire.

### 3.2 Applications

- Les niveaux de détails (LOD) : c'est l'application évidente de l'analyse multirésolution à base d'ondelettes.
- La transmission progressive : au début on transmet le maillage approximatif le plus grossier, suivi des détails progressivement. A la réception on affiche l'approximation et on l'améliore au fur et à mesure par les détails recus.
- Le contrôle de performance : la possibilité du passage d'un niveau de détail à un autre permet de contrôler le nombre de facettes à rendre (frame rate)
- Le tatouage hiérarchique : et ceci par l'insertion de la marque en combinaison avec les détails à chaque niveau de résolution sans altérer d'une façon visible le maillage initial.

### 3.3 Types de maillages

#### 3.3.1 Maillage irrégulier

Ce maillage est caractérisé par le fait que les sommets ont une valence variable (la valence est le nombre des voisins directs d'un sommet), voir FIGURE 3.1.

---

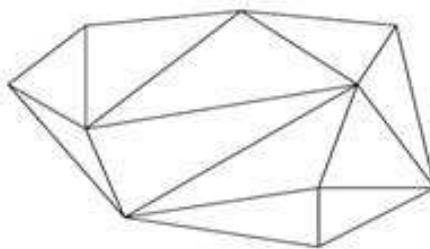


FIGURE 3.1 – Exemple d'un maillage irrégulier

### 3.3.2 Maillage régulier

Ce maillage est caractérisé par le fait que tous les sommets ont une valence constante, voir FIGURE 3.2.

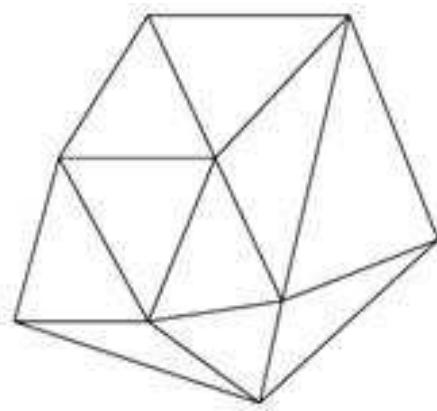


FIGURE 3.2 – Exemple d'un maillage régulier

### 3.3.3 Maillage semi-régulier

Ici la valence n'est pas forcément constante, et en fait, un maillage semi-régulier est le résultat d'un subdivision triangulaire 1 à 4 d'un maillage de départ, un certain nombre de fois, voir FIGURE 3.3.

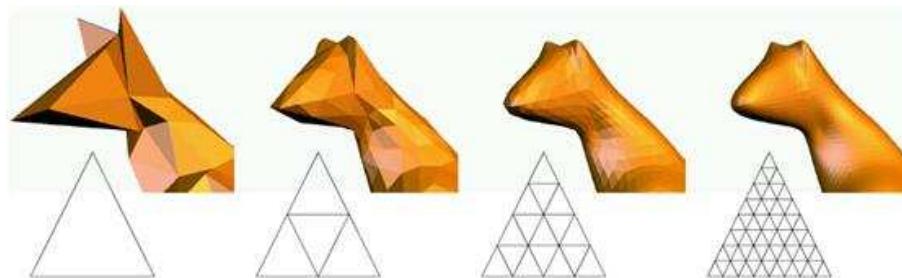


FIGURE 3.3 – Exemple d'un maillage semi-régulier

---

## 3.4 La transformation en maillage semi-régulier

Pour que l'analyse en ondelettes soit applicable, le maillage initial doit être semi-régulier, donc pour un maillage arbitraire, on doit le transformer en maillage semi-régulier, pour cela plusieurs méthodes ont été développées, à savoir :

### 3.4.1 La méthode MAPS (Multiresolution Analysis Parametrization of Surfaces)

Elle se base sur la simplification hiérarchique DK [DK83] qui garantit que le nombre des niveaux est  $O(\log N)$ , mais elle l'étend pour des polyèdres général, non seulement pour les polyèdre convexes. Le principe de la méthode [LSS<sup>+</sup>98] est basé sur la simplification par décimation des sommets, suivi par une phase de remaillage .

### 3.4.2 La méthode SWARPS (Shrink Wrapping Approach to Remeshing Polygonal Surfaces)

Dans les anciens algorithmes, l'échantillonnage de la surface est fait par la résolution du problème de localisation de point pour les coordonnées barycentrique dans le maillage de base et après de trouver le point correspondant dans le maillage originale. Ces méthodes sont d'ordre général, cependant les triangles résultants ne sont pas lisses sur les bords entre les carreaux qui appartiennent aux triangles de base.

Le principe de la méthode [KVLpS99] est de faire emballer l'objet par un maillage triangulaire puis faire rapprocher les sommets de ce dernier à la surface sous-jacente de l'objet par des forces attractives et des forces répulsives.

### 3.4.3 La méthode de Igor GUSKOV (Manifold-based Approach to Semi-regular Remeshing)

Ici[Gus06], la transformation d'un maillage irrégulier en un autre semi-régulier se fait en trois étapes essentielles :

- Construction du diagramme de Voronoï.
- Déduction de la triangulation de delaunay à partir du diagramme de Voronoï.
- Paramétrisation du remaillage du modèle obtenu dans l'étape précédente.

Cette étape est primordiale, parce que en fait les méthodes de subdivision décrites ci-dessous ne peuvent pas être appliquées sur des maillages arbitraires. L'exemple (FIGURE 3.4) suivant montre le résultat de cette transformation appliquée sur le modèle 3D de la statue david. Il est à noter que l'implémentation de cette dernière méthode (faite par l'auteur lui-même), m'a servi durant mon travail, pour transformer un maillage irrégulier en un semi-régulier.

## 3.5 Les ondelettes

### 3.5.1 Les ondelettes de Haar

L'élément clé de l'analyse multirésolution est les espaces vectoriels. Chaque espace vectoriel inclut les espaces vectoriels de basse résolution, et lui-même est inclus dans un autre espace vectoriel de haute résolution. Le passage d'un espace à un autre se fait par la fonction d'échelle des ondelettes. Pour chaque espace vectoriel  $V_j$ , il existe un autre espace

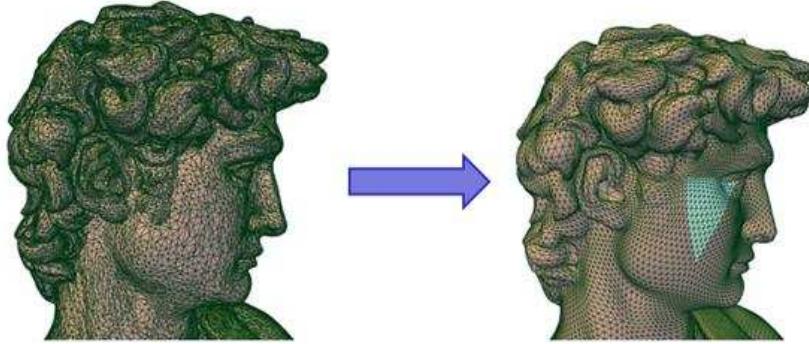


FIGURE 3.4 – Modèle 3D de la statue david : à gauche : le maillage irrégulier, à droite : le maillage semi-régulier

complémentaire orthogonal appelé  $W_j$  fourni par une fonction ondelettes proprement dite. On démarré par l'ondelette de Haar à cause de sa simplicité.  
Les fonctions d'échelle et d'ondelettes sont définies comme illustre la figure FIGURE 3.5

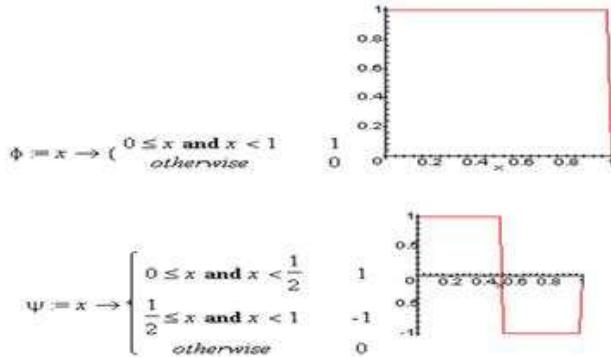


FIGURE 3.5 – Les fonctions ondelettes et échelle de Haar

**Principe :** Pour comprendre le principe on prend cet exemple permettant de compresser une image de quatre pixels :

la fonction d'échelle :  $\phi(X) = (X_i + X_{i+1})/2$

la fonction ondelettes :  $\psi(X) = (X_i - X_{i+1})/2$

Niveau 2 : [9 7 3 5]     $(9+7)/2 = 8$      $(9-7)/2 = 1$      $(3+5)/2 = 4$      $(3-5)/2 = -1$

Niveau 1 : [8 4 1 -1]     $(8+4)/2 = 6$      $(8-4)/2 = 2$     [8 4] approximation [1 -1] détails

Niveau 0 : [6 2 1 -1]    [6] approximation [2 1 -1] détails

On remarque ici qu'on a deux types de données ; approximation et détail. Donc on a compressé [9 7 3 5] en [6 2 1 -1]. même apparemment on n'a pas gagné d'espace, mais généralement les détails ne sont pas importants et souvent égaux à zéro ce qui rend leur compression très aisée.

### 3.5.2 Les bancs de filtres

Comme on a vu dans les ondelettes de Haar, il y a deux types de données : approximation et détail. Ces coefficients sont extraits utilisant deux types de filtres ; passe-bas (pour les détails), et passe-haut (pour l'approximation). L'application de ces deux filtres se fait récursivement : au début sur le signal original et après sur l'approximation, jusqu'à ce que l'approximation soit un nombre unique (FIGURE 3.6).

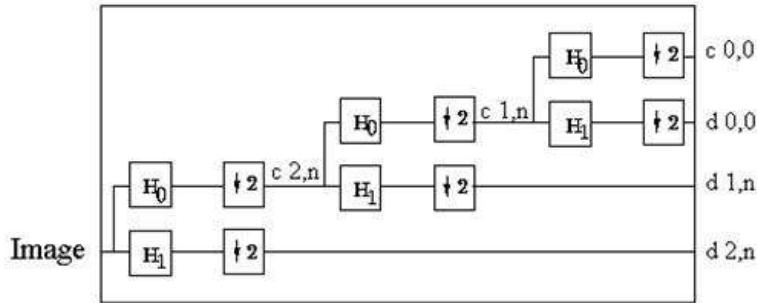


FIGURE 3.6 – Banc de filtres

### 3.5.3 Transformée en ondelettes par le schéma lifting

le schéma lifting a été développé en 1994, et il est inspiré du travail des Lounsbery *et al.*[LDW94] concernant la transformée en ondelettes des maillage et du travail du Donoho [Don92] qui concerne l'interpolation des transformées en ondelettes, et les travaux de Vetterli et Herley [VH92] sur la construction du banc filtre et la décomposition local présentée par Carnicer, Dahmen et Pena. Le schéma lifting travaille dans le domaine spatial ce qui évite prétraitement de l'analyse de Fourier, en plus il a la caractéristique qu'il dispose de la possibilité de généralisation pour les géométrie complexes. on a deux composantes :

- L'approximation
- Les détails

On retarde le principe de fonctionnement à une section ultérieure

## 3.6 Les méthodes de subdivision comme des filtres pour l'analyse/synthèse par ondelettes des maillages 3D

### 3.6.1 Définition :

Une surface de subdivision est un schéma de subdivision qui est appliqué à un maillage initial produisant un maillage lisse. Ce procédé agit sur le maillage en le subdivisant, en créant de nouveaux points et de nouvelles faces. La position des nouveaux points est calculée à partir de celle des anciens points les plus proches. Dans certains schémas, les positions des anciens points sont aussi remises à jour à partir des nouveaux points.

Ce procédé produit un nouveau maillage contenant bien plus de faces polygonales que l'ancien maillage. Le nouveau maillage peut alors servir comme données d'entrée au même schéma de subdivision, afin de raffiner encore plus. Cependant le but de l'application itérative d'un schéma de subdivision n'est pas forcément de produire un maillage plus lisse que le maillage d'entrée.

**Catégories :** Les schémas de subdivision surfacique ayant pour but le lissage peuvent être classés en 2 catégories : les schémas interpolants et les schémas approximants.

**Les schémas interpolants** Les schémas interpolants sont utilisés lorsque les nouveaux points doivent être exactement sur les vecteurs originaux. Exemples :

- Butterfly, Triangle
- Midedge
- kobbelt

**Les schémas approximants** Les schémas approximants peuvent ajuster les positions des nouveaux points. Ce qui donne en général un meilleur lissage, mais l'utilisateur a moins de contrôle sur le résultat final. Exemples :

- Catmull-Clark
- Doo-Sabin
- Chaikin
- Loop
- Mid-Edge
- $\sqrt{3}$

Application :

- Lissage des surfaces
- La reconstruction de la surface
- Compression de maillage
- Rétro-conception ou l'approximation pour maillage triangulé dense

**Principe :** on divise les arêtes par l'ajout de sommets dont les coordonnées sont déduits à partir une pondération des coordonnées des sommets voisins selon un masque approprié. Ce dernier diffère d'une méthode à une autre.

### 3.6.2 Exemples de méthodes de subdivision

#### 3.6.2.1 Subdivision loop

La subdivision loop consiste à insérer un sommet à chaque arête ce qui transforme un triangle en quatre. La combinaison de cette subdivision avec la transformée en ondelettes qui calcule localement les axes des moindres carrés par rapport à une basse résolution, puis elle les transforme par la suite à des coefficients d'ondelettes. Ces derniers permettent de récupérer les détails à chaque niveau de subdivision de telle sorte que la synthèse soit faisable. Dans cette méthode le masque utilisé est illustré dans la figure FIGURE 3.7.

Dans un premier temps, on introduit des nouveaux sommets, puis on repositionne les anciens sommets, ce qui résulte une division de chaque triangle en quatre. Le calcul se fait selon la formule suivante :

$$\begin{aligned} e' &= e + \frac{3}{8}(V_0 + V_1) + \frac{1}{8}(V_2 + V_3) \\ v' &= \beta(n)v + \frac{1-\beta(n)}{n} \sum_{i=0}^n e'_i, \\ \beta(n) &= \frac{8}{5}\alpha(n) - \frac{3}{5} \end{aligned}$$

$\alpha(n)$  est une pondération qui dépend de la valence n, ce qui nous fournit une surface lisse. Ce processus de subdivision va nous fournir les fonctions ondelettes lazy  $e$ , et les fonctions

---

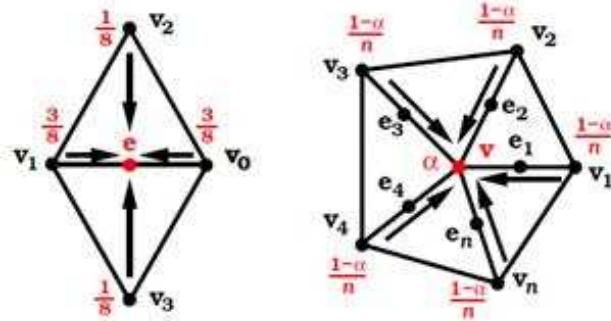


FIGURE 3.7 – Masque de la subdivision loop

d'échelle  $\mathbf{v}$ . On remarque que l'inverse est déduit facilement à partir des équations précédentes ce qui assure l'analyse et la synthèse.

Cependant l'inverse de la subdivision présente des dégradations de qualité, pour cela, une opération de lifting s'avère nécessaire.

On doit construire les fonctions d'ondelettes par orthogonalization des fonctions ondelettes lazy avec quatre fonctions d'échelle. Donc on doit obtenir les poids, afin que :

$$\psi = \psi_l + \sum_{i=0}^3 \omega_i \phi_i, \quad \langle \psi, \phi_i \rangle = 0$$

Ceci revient à résoudre un système d'équation pour obtenir les poids  $\omega_i$ . Notons que l'application de l'orthogonalisation donne les mêmes résultats que la méthode des moindres carrés lors une application globale

### 3.6.2.2 Subdivision Butterfly

Elle se base sur le principe que toutes les surfaces BSpline peuvent être définies par une subdivision récursive.

Le masque Butterfly est comme montre la figure FIGURE 3.8

Le calcul se fait selon la formule :

$$\bar{q}^{k+1} = \frac{1}{2}(\bar{p}_1^k + \bar{p}_2^k) + 2\omega(\bar{p}_3^k + \bar{p}_4^k) - \omega(\bar{p}_5^k + \bar{p}_6^k + \bar{p}_7^k + \bar{p}_8^k)$$

Un exemple de l'application de la subdivision Butterfly sur une surface est illustré dans la figure FIGURE 3.9.

### 3.6.2.3 Le triangle moyen

Le masque est comme montre la figure FIGURE 3.10

La formule :

$$\begin{aligned} V^i &= \frac{1}{4}P^i + \frac{3}{8}P_j^i + \frac{3}{8}P_{j+1}^i \\ V^{i+1} &= \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n V_j^i \end{aligned}$$

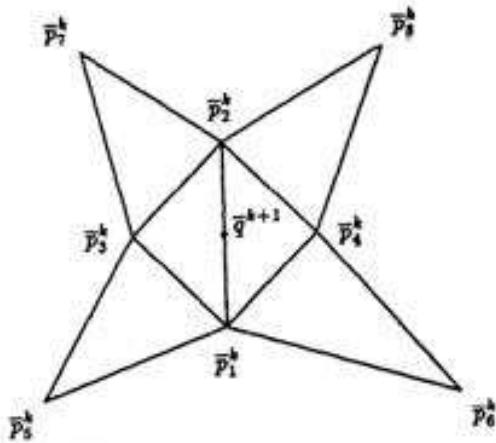


FIGURE 3.8 – Masque de la subdivision Butterfly

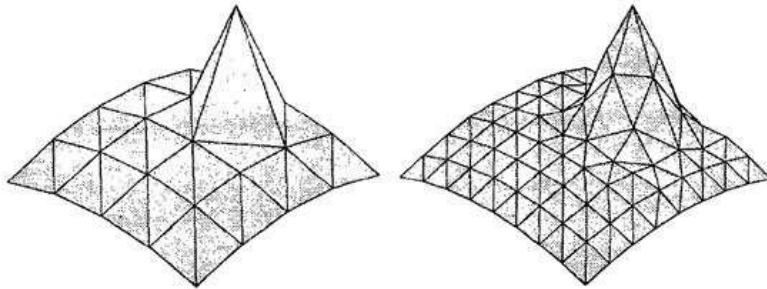


FIGURE 3.9 – Exemple d'une surface subdivisée par la subdivision Butterfly

### 3.7 Fonctionnement de la transformée en ondelettes par le schéma lifting

On définit un maillage comme une paire  $M = (K, V)$

$V$  : la géométrie du maillage, c'est l'ensemble des sommets :  $V = \{V_1, \dots, V_n\}$ .

$K$  : la topologie du maillage, c'est l'ensemble des facettes :  $K = \{\cup_j U_j / U_j = \{v_l, \dots, v_k\}\}$ . Considérant un signal (maillage)  $S_j$  avec  $2^j$  échantillons(sommets). La transformation en ondelettes de ce signal, donne lieu à un signal grossier  $S_{j-1}$  et un signal détail  $D_{j-1}$ .

#### 3.7.1 La transformée directe du schéma lifting

Elle se résume en trois étapes : split, predict, et update (FIGURE 3.11).

**Split :** cette étape se charge de diviser le signal en 2 sous-signaux disjoints, Dans notre cas, le premier signal représente l'approximation et l'autre représente le détail, au niveau  $j-1$ . ce bloc s'appelle aussi la transformée en ondelette lazy :

$$\text{Split}(s_j) = (\text{approximation } j-1, \text{détail } j-1)$$

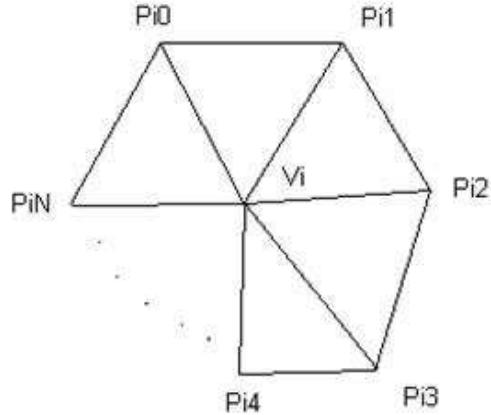


FIGURE 3.10 – Masque de la subdivision du triangle moyen

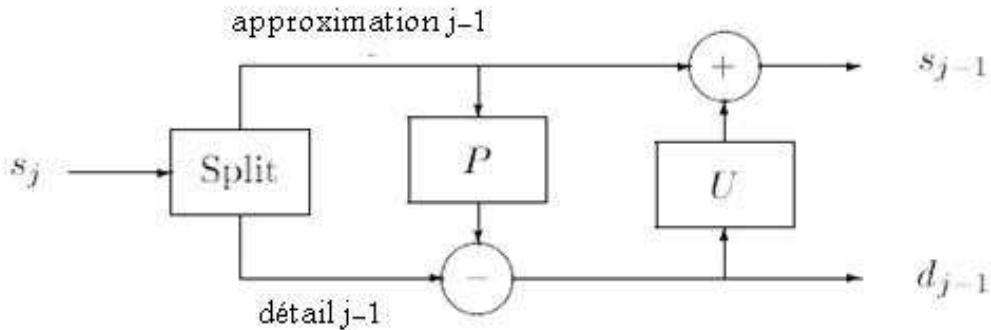


FIGURE 3.11 – Transformée directe du schéma lifting

**Predit :** cette étape se charge de prédire les détails, précédemment séparés, à partir de l'approximation (à travers l'interpolation), puis on soustrait les vrais détails par ces prédictions. De cette façon les détails se redéfinissent comme un déplacement par rapport à l'approximation, et ceci porte plusieurs avantages, entre autre, minimisation du cout du stockage (si le signal est constant, les détails valent zéro) :

$$\text{Détail } j-1 = \text{détail} - \text{Predict}(\text{approximation } j-1)$$

**Update :** afin que le signal approximatif garde les détails en soi-même tout en respectant l'ordre (topologie), l'étape update permet de mettre les détails à jour pour qu'ils soient conformément insérés dans l'approximation :

$$\text{approximation } j-1 = \text{approximation } j-1 + \text{Update}(\text{détail } j-1)$$

### 3.7.2 La transformée inverse du schéma lifting :

Donc, à partir de ça, on pourrait définir facilement la transformée inverse du schéma lifting en inversant le schéma comme montre la figure FIGURE 3.12

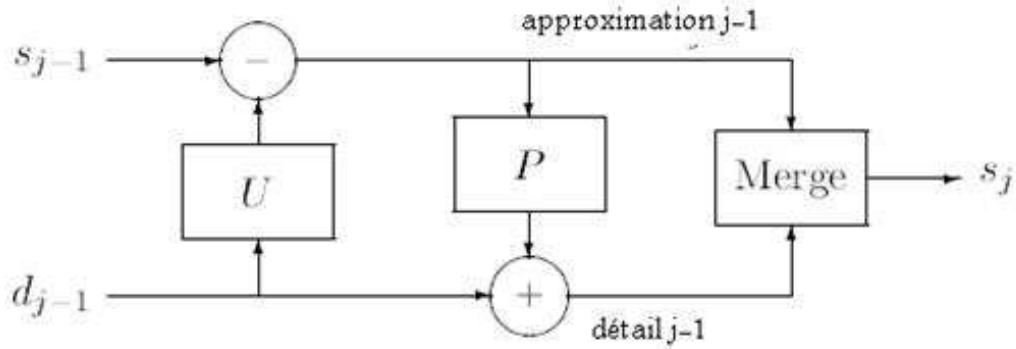


FIGURE 3.12 – Transformée inverse du schéma lifting

Dans ce cas, on a seulement un nouvel opérateur :

**Merge** : cette étape se charge de fusionner les détails J-1 et l'approximation J-1 ce qui résulte le signal J.

**Exemple** : cas d'un signal unidimensionnel (FIGURE 3.13).

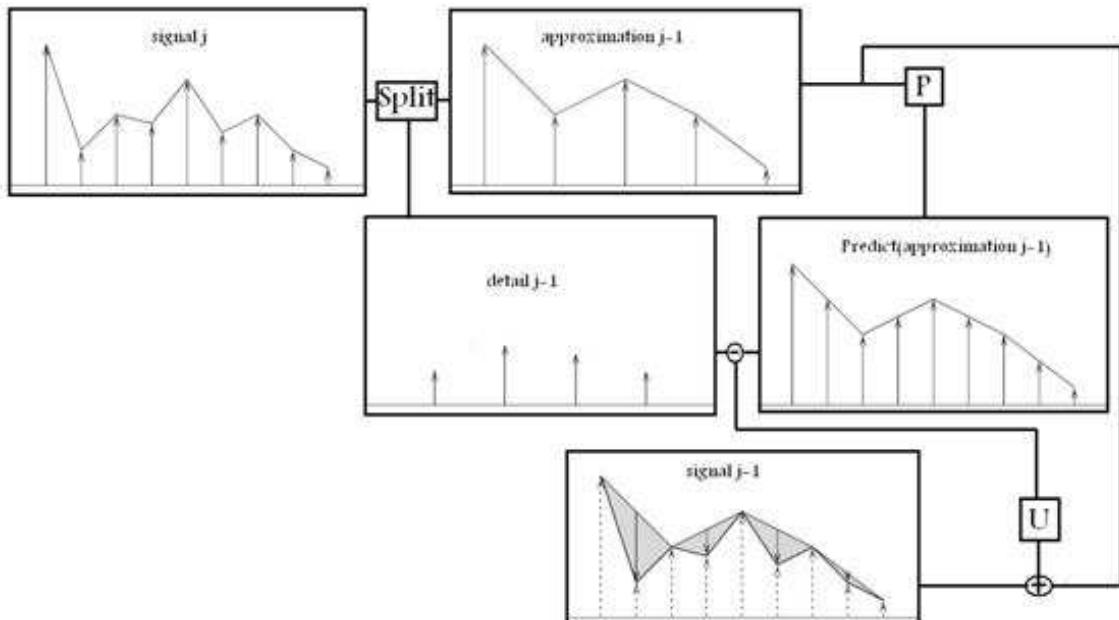


FIGURE 3.13 – Exemple du schéma lifting d'un signal unidimensionnel

#### Caractéristiques :

- calcul sur place : la méthode du lifting permet de faire les calculs sur place. En d'autres termes, le signal de sortie est codé sur le même emplacement mémoire que

le signal d'entrée. Cette méthode permet de faire une économie importante en terme de mémoire

- Efficacité : Dans la plupart des cas, le nombre d'opération est réduit par rapport à un filtrage de deux sous-bandes indépendant. En effet, le lifting calcule simultanément les bandes basses et haute fréquences, et les sous-expressions sont réduites du fait qu'elles soient réutilisées
- Réversible : le schéma lifting inverse est trivial. Il s'obtient en inversant l'ordre des opérations et en les défaisant
- Généralité : la transformée est mise en œuvre sans la moindre référence au domaine de Fourier. L'extension du schéma à d'autres cadres d'applications est extrêmement facilitée.

### 3.8 Le schéma lifting pour un maillage semi-régulier

L'exemple précédent était pour un signal unidimensionnel. Dans le cas d'un maillage 3D semi-régulier le schéma lifting sera toujours applicable grâce à la structure topologique hiérarchique particulière du maillage semi-régulier (FIGURE 3.14).

Il est à noter que le schéma lifting de base concerne un seul étage, alors qu'on puisse

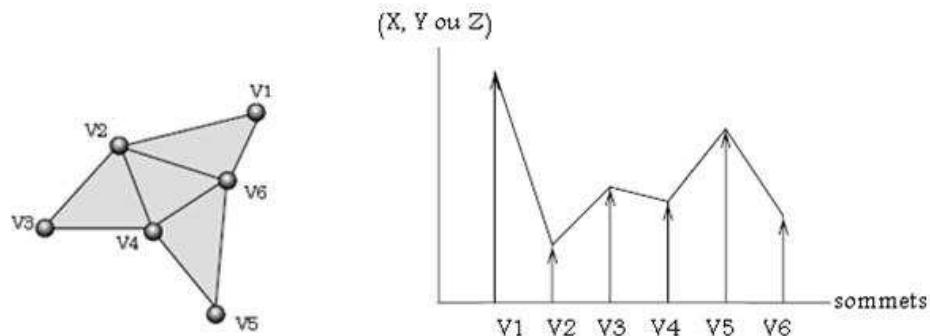


FIGURE 3.14 – Schéma lifting pour un maillage semi-régulier

construire un schéma plus complexe comportant plusieurs étages (utilisant une succession d'opérateurs :split, predict, update, pour la transformée directe, et de l'autre côté une autre succession d'opérateurs : update,predict, merge) Maintenant pour faire une décomposition en ondelettes d'un maillage semi-régulier de profondeur J, on doit construire un schéma lifting comportant J étages (FIGURE 3.15).

De cette façon, on aura une suite de maillages simplifiés, plus les détails à chaque niveau de résolution (FIGURE 3.16).

### 3.9 Conclusion :

Donc le résultat de l'application de l'analyse en ondelettes par le schéma lifting à J étages, sur un maillage semi-régulier, va fournir un maillage grossier , plus J détails qui

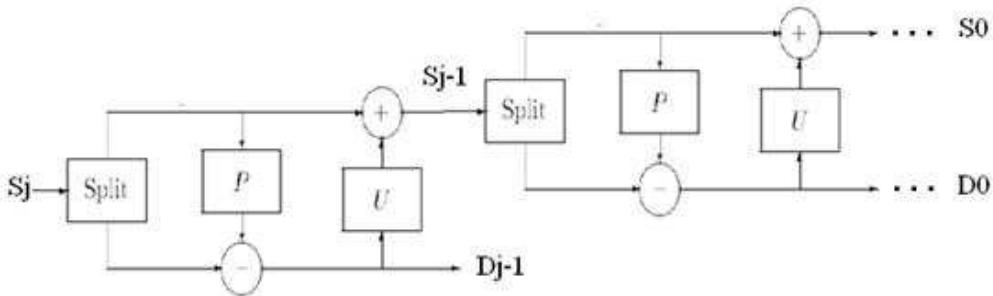


FIGURE 3.15 – Schéma lifting à J étages

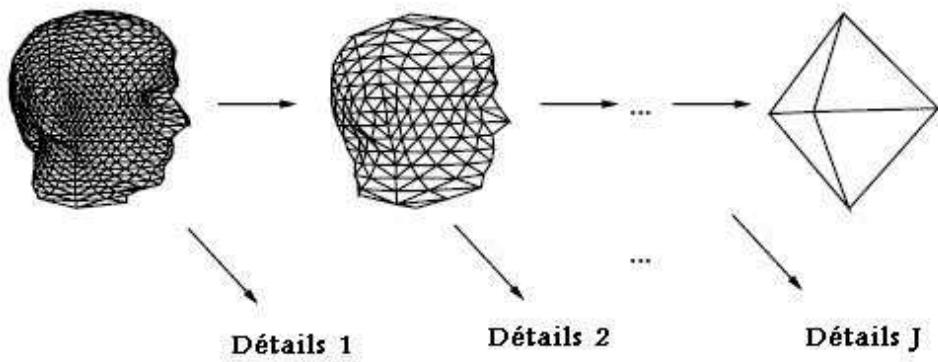


FIGURE 3.16 – Suite de maillages à plusieurs niveaux de détails

correspondent aux coefficients d'ondelettes. A partir d'ici la méthode de tatouage hiérarchique de WANG *et al.*, devient faisable.

## Chapitre 4

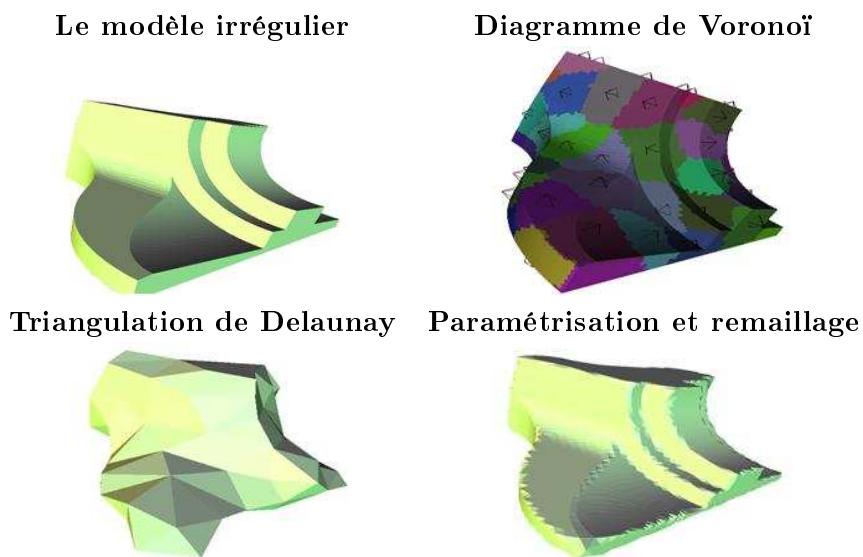
# Mise en œuvre du tatouage multirésolution

### 4.1 Introduction

L'objet 3D choisi pour ce travail est le fandisk . Le fandisk irrégulier comporte : 6475 sommets, 12946 triangles

### 4.2 La transformation en semi-régulier

Sa transformation en un maillage semi-régulier, est faite par un programme réalisé par Igor GUSKOV( l'auteur de : Manifold-based Approach to Semi-regular Remeshing), selon les étapes suivantes :



Le fandisk semi-régulier ci-dessus comporte : 4802 sommets, et 9600 triangles. Donc tout le travail qui vient après est basé sur ce modèle.

### 4.3 La transformée en ondelettes

L'implémentation de la transformée en ondelettes par le schéma lifting telle qu'elle est décrite dans le chapitre précédent, nous permet d'avoir progressivement des maillages approximatifs (grossiers), plus des détails. En fait, ces derniers correspondent aux coefficients d'ondelettes (dont on s'intéresse pour faire le tatouage). Et à travers le schéma lifting inverse de la transformée en ondelettes, le passage d'un maillage de niveau( $J$ ), à un autre de niveau ( $J+1$ ), est faisable et bidirectionnel (FIGURE 4.1).

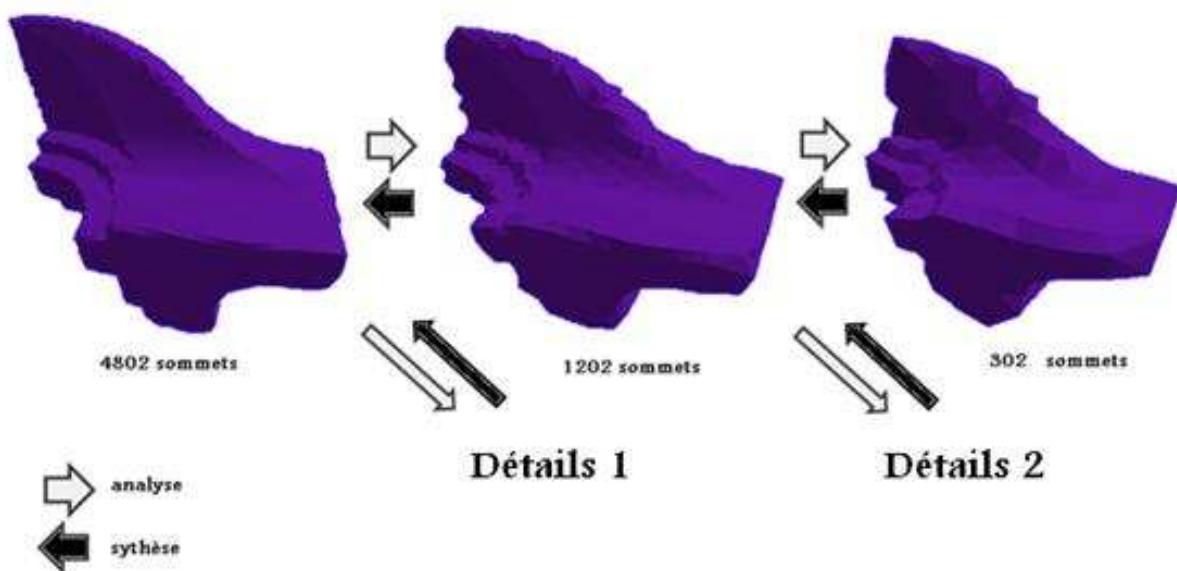


FIGURE 4.1 – Maillage multirésolution du fandisk

### 4.4 Le tatouage hiérarchique basé ondelettes (méthode WANG et al.)

On rappelle que la technique de tatouage hiérarchique aveugle présentée par Wang et al., se base sur l'insertion d'un bit dans chaque coefficient d'ondelettes, et ceci pour chaque niveau de résolution (voir CHAPITRE 2). La capacité maximale pour cette technique de tatouage n'est pas déduite automatique, elle dépend de la nature du maillage hiérarchique, et elle égale à un bit par coefficient d'ondelettes (ce qui la limite supérieurement à un bit/sommet). Pour notre modèle, la capacité maximale est de : 4725 bits (pour 4802 sommets) ci-dessous un tableau qui récapitule le résultat d'un tatouage hiérarchique avec des différentes mesures (distorsion, capacité et robustesse) et ceci pour trois paramètres de contrôle différents (donc trois pas de quantification différents)

modèle	distorsion	capacité	robustesse	$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$
	0.00036	4725	+	100000
	0.0348	4725	+++	1000
	0.1155	4725	++++	300

Il faut noter ici, que la distorsion est exprimée par la distance moyen de hausdorff simplifiée dans le cas discret[ASCE02] entre le modèle original et celui tatoué. Donc plus que la distorsion augmente, plus que l'imperceptibilité diminue, et inversement. La distorsion est calculé suivant la formule suivante :

$$\text{distorsion} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} d(V_i, V'_i)$$

$$d(V_i, V'_i) = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2 + (Z - Z')^2}$$

N :nombre de sommets

(X,Y,Z) : sont les coordonnées des sommets du modèle original

(X',Y',Z') : sont les coordonnées des sommets du modèle tatoué ainsi que, on a pu atteindre la capacité maximale pour les trois paramètres de contrôle différents, mais la robustesse est inversement proportionnel à ces derniers.

## 4.5 Résultats expérimentaux

Le graph montré par la figure FIGURE 4.2 est obtenu en faisant subir notre modèle tatoué (hiérarchiquement par trois marques, chacune à un niveau de résolution, en tout 4725 bits) à un bruit gaussien dont les les écarts-types varient de 1,0E-08 jusqu'à 1,0E-1. durant cet expérimentation, on mesure le BER(Bit Error Rate), mais aussi la désynchronisation. Cette deuxième mesure s'avère judicieuse du fait que la source de l'erreur n'est pas uniquement la mauvaise quantification des coefficients d'ondelettes, mais aussi la perte de la synchronisation initiale, c'est-à-dire la perte de l'ordre suivant lequel on a inséré la marque (ordre décroissant des arêtes associées aux coefficients d'ondelettes).

Ces mesures ont été refaites pour le même modèle tatoué uniquement dans chacun des

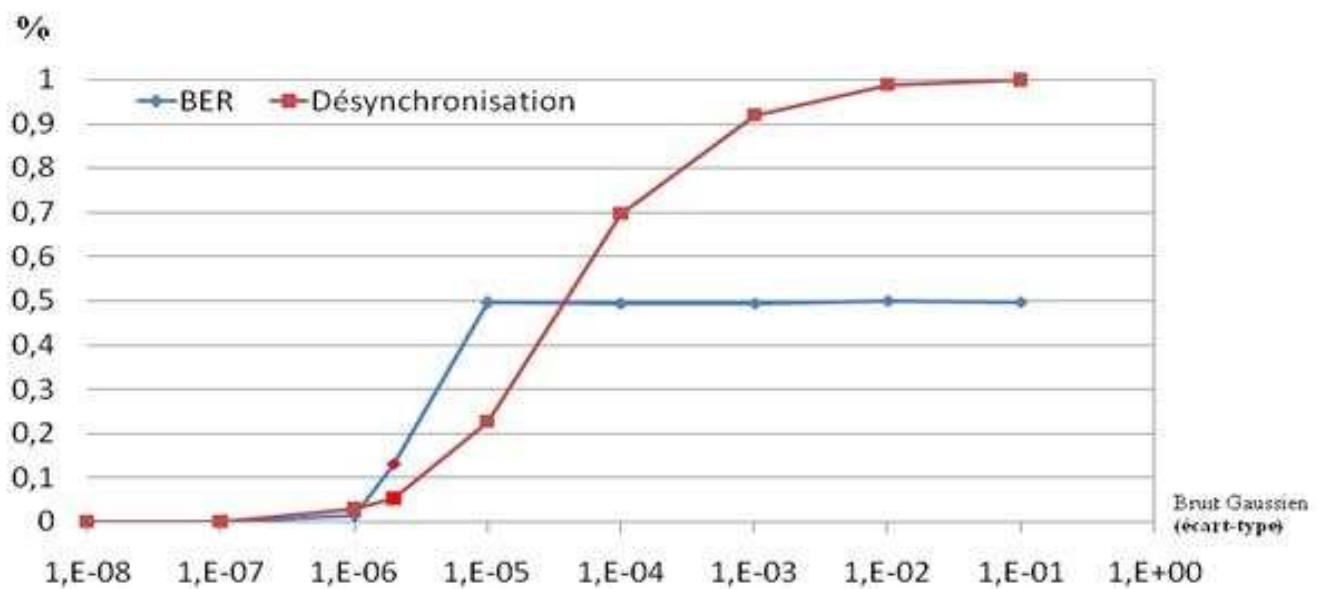


FIGURE 4.2 – Graphe des courbes : BER et désynchronisation (tatouage hiérarchique)

niveaux de résolution.

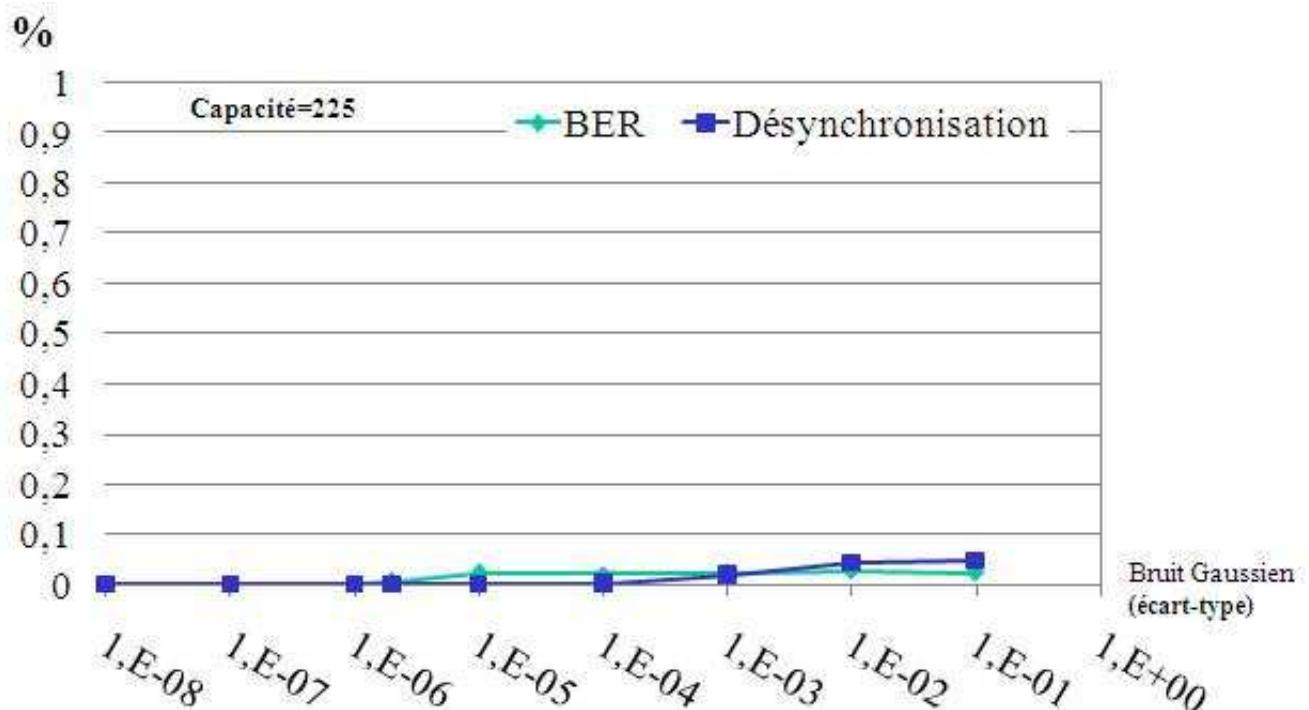


FIGURE 4.3 – Graphe des courbes : BER et désynchronisation (tatouage au 1<sup>er</sup> niveau)

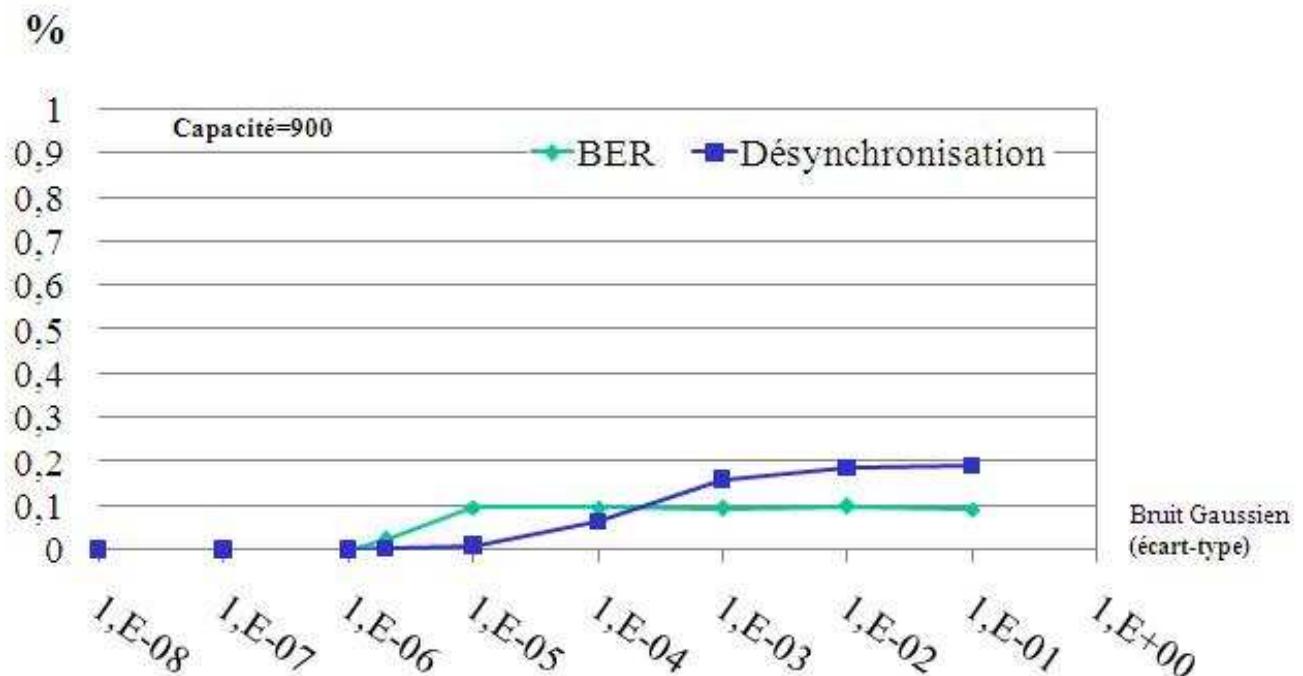


FIGURE 4.4 – Graphe des courbes : BER et désynchronisation (tatouage au 2<sup>me</sup> niveau)

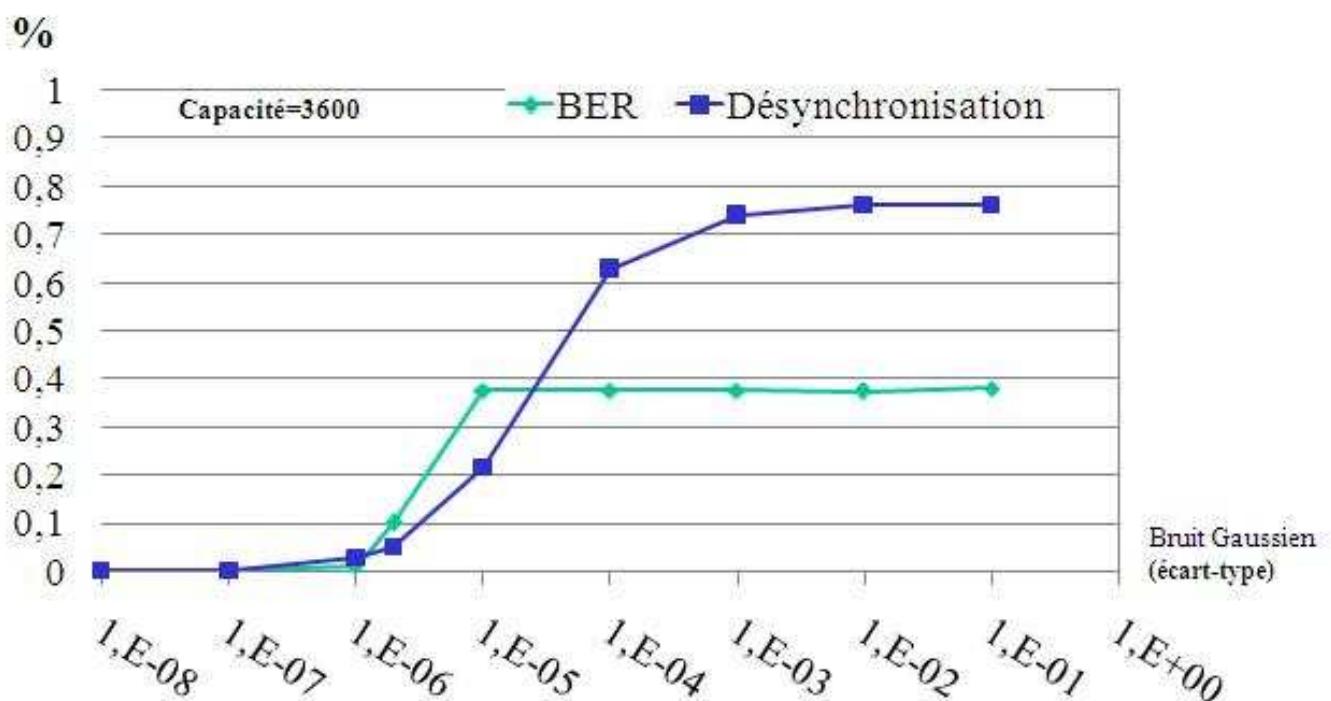


FIGURE 4.5 – Graphe des courbes : BER et désynchronisation (tatouage au 3<sup>me</sup> niveau)

## 4.6 Analyse

- Il s'aperçoit que la courbe BER atteint ses basses valeurs dans le graphe de la figure FIGURE 4.3 qui correspond au tatouage du 1<sup>er</sup> niveau de résolution, et ceci explique bien la robustesse de la méthode du tatouage de WANG dans la basse résolution.
- Contrairement aux basses résolutions, les hautes résolutions présentent une haute fragilité (FIGURE 4.4 et FIGURE 4.5).
- Il est évident que l'allure de la courbe BER suit celle de la désynchronisation, donc si on arrive à dégrader la courbe de désynchronisation, on aura un BER plus petit.

## 4.7 Proposition

Exploitant la structure hiérarchique du maillage semi-régulier va nous permettre, de remplacer l'arrangement ou la synchronisation globale (qui est le tri décroissant de toutes les arêtes d'un tel niveau de résolution) par un tri local des arêtes au niveau de chaque triangle, et un tri des triangles fils au niveau de chaque triangle père, et ceci est faisable grâce à l'arborescence du maillage semi-régulier. Prenant l'exemple montré dans la figure FIGURE 4.6.

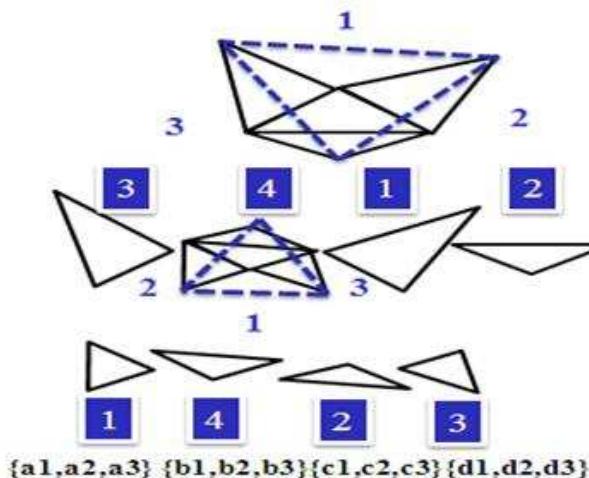


FIGURE 4.6 – Tri hiérarchique des arêtes d'un maillage semi-régulier

	Tri global	Tri local
Ordre initial	{c1,d2,a3, b1,b2,d3, d1,c2,c3, <b>a1</b> ,a2,b3}	{ <b>a1</b> ,a2,a3, c1,c2,c3, d1,d2,d3, b1,b2,b3}
Ordre après le bruit de a1 en <b>a1</b>	{c1,d2,a3, b1,b2, <u><b>a1</b></u> ,d3, d1,c2,c3,a2,b3}	{ <u><b>a2</b></u> , <u><b>a1</b></u> ,a3, c1,c2,c3, d1,d2,d3, b1,b2,b3}

Ceci permet de délimiter et centraliser une erreur sur un triangle, là où une utilisation conjointe d'un code correcteur d'erreur pourrait avoir lieu.

## 4.8 Conclusion

Les résultats expérimentaux présentés ci-dessus, montre l'influence de l'allure de la courbe désynchronisation sur celle de la courbe BER, et donc, ils promettraient d'avoir un BER plus petit, si on arrivait à diminuer la courbe désynchronisation.



# Conclusion générale

On clôture ce travail par quelques constatations :

- La décomposition en ondelettes d'un maillage 3D, s'avère un outil puissant et efficace permettant la mise en œuvre du tatouage hiérarchique sur tous les niveaux de résolution :
  - Haute capacité.
  - Robustesse contre les transformations affines.
- Cependant, la robustesse face au bruit est limitée à la basse résolution
- Comme l'analyse en ondelettes pour les maillages 3D, est restreinte à ceux dont la topologie est semi-régulière, un travail assez récent propose une approche d'analyse multirésolution sur un maillage irrégulier[MVP04], ce qui ote l'obligation de transformer un maillage arbitraire à son équivalent semi-régulier.

Comme perspective, j'aurais implémenté ma proposition du CHAPITRE 4, si j'avais eu du temps suffisant.

---



# Bibliographie

- [APDP10] P. Amat, W. Puech, S. Druon, and J. P. Pedeboy. Lossless 3d steganography based on mst and connectivity modification. *Signal Processing : Image Communication*, May 2010.
- [ASCE02] N. Aspert, D. Santa-Cruz, and T. Ebrahimi. Mesh : Measuring errors between surfaces using the hausdorff distance. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, volume I, pages 705 – 708, 2002. <http://mesh.epfl.ch>.
- [Ben99] Oliver Benedens. Geometry-based watermarking of 3d models. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19 :46–55, 1999.
- [Bor06] Adrian G Bors. Watermarking mesh-based representations of 3-d objects using local moments. *IEEE Trans Image Process*, 15(3) :687–701, 2006.
- [Chu92] C.K. Chui, editor. *An Introduction to Wavelets*. pub-acad-pr, pub-acad-pr :adr, 1992.
- [DK83] David P. Dobkin and David G. Kirkpatrick. A linear algorithm for determining the separation of convex polyhedra. Technical report, Vancouver, BC, Canada, Canada, 1983.
- [Don92] David L. Donoho. Interpolating wavelet transforms, 1992.
- [DVP03] F. Deguillaume, S. Voloshynovskiy, and T. Pun. Secure hybrid robust watermarking resistant against tampering and copy attack. *Signal Process.*, 83(10) :2133–2170, 2003.
- [Gus06] Igor Guskov. Manifold-based approach to semi-regular remeshing, 2006.
- [KDKD98] Satoshi KANAI, Hiroaki DATE, Takeshi KISHINAMI, and Satoshi Kanai Hiroaki Date. Digital watermarking for 3d polygons using multiresolution wavelet decomposition. In *Proc. Sixth IFIP WG 5.2 GEO-6*, pages 296–307, 1998.
- [Ker83] Auguste Kerckhoffs. La cryptographie militaire. *Journal des sciences militaires*, IX :5–83, January 1883.
- [KVLpS99] Leif P. Kobbelt, Jens Vorsatz, Ulf Labsik, and Hans peter Seidel. A shrink wrapping approach to remeshing polygonal surfaces, 1999.
- [LDW94] Michael Lounsbery, Tony D. DeRose, and Joe Warren. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type, 1994.
-

- [LSS<sup>+</sup>98] Aaron W. F. Lee, Wim Sweldens, Peter Schroder, Lawrence Cowsar, and David Dobkin. Maps : Multiresolution adaptive parameterization of surfaces, 1998.
- [Mal89] Stephane G. Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition : the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11 :674–693, 1989.
- [ME04] Y. Maret and T. Ebrahimi. Data hiding on 3d polygonal meshes. In *MM&#38;Sec '04 : Proceedings of the 2004 workshop on Multimedia and security*, pages 68–74, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [MVP04] Surface Meshes, Sébastien Valette, and Rémy Prost. Wavelet-based multiresolution analysis of irregular surface meshes. *IEEE Transactions On Visualization And Computer Graphics*, 10 :113–122, 2004.
- [OMA98] Ryutarou Ohbuchi, Hiroshi Masuda, and Masaki Aono. Data embedding algorithms for geometrical and non-geometrical targets in three-dimensional polygonal models. *Computer Communications, Vol.21, Issue*, 15 :1344–1354, 1998.
- [OMT02] Ryutarou Ohbuchi, Akio Mukaiyama, and Shigeo Takahashi. A frequency-domain approach to watermarking 3d shapes. *Computer Graphics Forum*, 21 :373–382, 2002.
- [PF99] Emil Praun and Adam Finkelstein. Robust mesh watermarking. In *In : Proceedings of SIGGRAPH Š99*, pages 49–56, 1999.
- [UCB04] F. Uccheddu, M. Corsini, and M. Barni. Wavelet-based blind watermarking of 3d models. In *MM&#38;Sec '04 : Proceedings of the 2004 workshop on Multimedia and security*, pages 143–154, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [VH92] Martin Vetterli and Cormac Herley. Wavelets and Filter Banks : Theory and Design. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 40(9) :2207–2232, 1992.
- [WLDB07] Kai Wang, Guillaume Lavoué, Florence Denis, and Atilla Baskurt. Tatouage hiérarchique et aveugle de maillages tridimensionnels. In *CORESA'07 : COMpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*, pages 139–143, November 2007.
- [ZY03] L.F. Kwok Z. Yu, H.H.S. Ip. A robust watermarking scheme for 3d triangular mesh models. 36(11), 2003.