

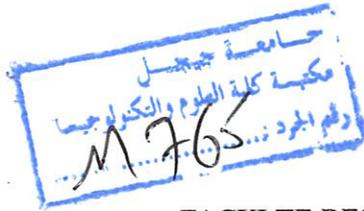
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE JIJEL

M/AUT.TS  
2011/07



FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

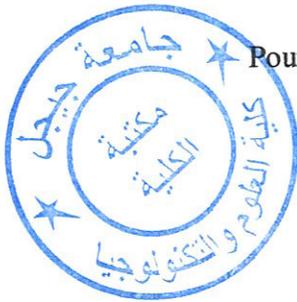
MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master en Automatique

Option : Automatique et Traitement du Signal

Présenté par :

*Wafa Belmerabet*



**ÉTUDE D'UN SYSTÈME DE TATOUAGE DES  
IMAGES NUMÉRIQUES BASÉ SUR LES  
ONDELETTES ET LA DÉCOMPOSITION  
MODALE EMPIRIQUE**

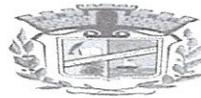
Soutenue publiquement le 16/06/2011 à l'amphi B devant le jury composé de :

Mr. Bouden Toufik	Maître de conférences A	Président
Mr. Boutana Daoud	Maître de conférences A	Examineur
M <sup>me</sup> Biad Souad	Maître assistante A	Rapporteur

Promotion 2010 /2011

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE JIJEL



FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master en Automatique

Option : Automatique et Traitement du Signal

Présenté par :

*Wafa Belmerabet*

**ÉTUDE D'UN SYSTÈME DE TATOUAGE DES  
IMAGES NUMÉRIQUES BASÉ SUR LES  
ONDELETTES ET LA DÉCOMPOSITION  
MODALE EMPIRIQUE**

Soutenue publiquement le 16/06/2011 à l'amphi B devant le jury composé de :

<b>Mr. Bouden Toufik</b>	Maître de conférences A	Président
<b>Mr. Boutana Daoud</b>	Maître de conférences A	Examineur
<b>M<sup>me</sup> Biad Souad</b>	Maître assistante A	Rapporteur

Promotion 2010 /2011

# Remerciement

*Avant tout je remercie le bon dieu, pour m'avoir aidé à accomplir ce travail dans des bonnes conditions.*

*Je tiens le remerciement à mon promoteur M<sup>me</sup> S. Amira-Biad d'avoir bien diriger pour réaliser ce travail par ses conseils, sa documentation, sa compréhension, sa patience et ses encouragements.*

*Les membres de jury pour m'avoir honoré en acceptant de juger mon travail, ainsi que l'équipe du département d'automatique qui ont contribué à ma formation.*

*Je remercie aussi tous mes amies de la promotion qui m'ont aidé à élaborer ce travail.*

*En fin je remercie tous les amies et toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A TOUTE MA FAMILLE*

*A TOUS MES AMIS FIDÈLES*

*A TOUS MES ENSEIGNANTS*

*A TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS*

*Wafa Belmerabet*

# Table de matière

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale.....1**

## **Chapitre I : Etat d'art sur le tatouage des images numériques**

I. Introduction.....	3
II. Définition d'image .....	3
2.1. Image numérique .....	3
2.2. Les types des images numériques.....	4
III. Le tatouage des images numériques.....	4
3.1. Définition.....	4
3.2. Historique .....	5
IV. Types de tatouage.....	6
4.1. Tatouage visible .....	6
4.2. Tatouage invisible.....	6
4.3. Tatouage fragile .....	7
V. Schéma général d'un système de tatouage.....	7
VI. Contraintes d'un schéma de tatouage efficace .....	9
6.1. Invisibilité .....	9
6.2. La sécurité .....	9
6.3. La robustesse .....	9
6.4. La capacité .....	10
VII. Techniques de tatouage.....	10
7.1. Classification selon le domaine d'insertion .....	10
7.2. Les méthodes additives .....	12
7.3. Les méthodes substitutives.....	14
7.4. Techniques de deuxième génération.....	15
VIII. Les applications de tatouage.....	16
IX. État de l'art des attaques sur les schémas de tatouage d'images.....	17
9.1. Attaques non intentionnelles.....	17

9.2. Les attaques intentionnelles.....	18
X. Conclusion.....	19
<b>Chapitre II : Techniques utilisées pour le tatouage des images numériques</b>	
I.Introduction.....	20
II.Analyse spectral.....	20
III.La décomposition ondelettes.....	21
3.1. Caractérisation de ma décomposition ondelettes.....	21
3.2. Condition d'admissibilité.....	23
3.3. Illustration du changement d'échelle et de la translation.....	23
3.4 L'algorithme de la transformée d'ondelettes continue CWT .....	23
3.5. La Transformée en Ondelettes Discrète (TOD).....	23
3.6. L'Analyse Multi-Résolution (AMR) .....	23
3.7. Généralisation aux images.....	27
3.7.1. Schéma de décomposition pour les images.....	28
IV. Décomposition Modale Empirique.....	29
4.1. Principe de l'EMD.....	30
4.2. Algorithme de l'EMD en mono dimension.....	31
4. 2. 1. Degrés de liberté dans la méthode.....	35
4.2.1.1. Choix d'une méthode d'interpolation.....	35
4.2.1.2. Sifting Process.....	35
4. 3. Problématique de l'EMD en 2D.....	35
4. 3. 1. Interpolation basée sur une triangulation.....	36
4.3.2. Interpolation par voisinage.....	37
4.4. Avantages et inconvénients de l'EMD.....	38
4.4.1. Avantages.....	38
4.4.2. Inconvénients.....	39
V. Décomposition en valeur singulières.....	39
VI. Conclusion.....	39
<b>Chapitre III : Simulation et discussion</b>	
I. Introduction.....	40
II. Plate forme de test.....	40
III. Mesure de qualité.....	41

---

IV. Algorithmes et résultats.....	42
IV.1. Algorithme basé sur les ondelettes.....	42
4. 1. 1. Etude du paramètre $\alpha$ .....	46
4.1.2. Choix du filtre utilisé.....	48
4.1.3. Choix de la sous bande d'insertion et du niveau de décomposition.....	48
4.1.4. Robustesse de l'algorithme basé sur les ondelettes.....	49
IV.2. Algorithme basé sur l'EMD.....	53
4. 2. 1. Choix entre IMFs et résidu.....	54
4.2.2. Robustesse de l'algorithme basée sur l'EMD.....	55
V. Comparaison entre l'algorithme de tatouage basé sur les ondelettes et celui basé sur l'EMD.....	59
VI. Banc de test.....	59
VII. Conclusion.....	61
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>62</b>
<b>Bibliographie</b>	

## Liste des figures

Page

Figure 1.1 : Schéma général du processus d'insertion d'une signature .....	7
Figure 1.2 : Schéma général du processus de détection d'une signature .....	8
Figure 1.3 : Schéma de tatouage d'une méthode additive .....	12
Figure 1.4 : Principe de l'insertion par Substitution .....	14
Figure 2.1 : Illustration de la variation du facteur d'échelle. (a) L'onde mère ; (b) L'ondelette pour $0 < a < 1$ ; (c) L'ondelette pour $a > 1$ .....	22
Figure 2.2: Schéma de décomposition en espace d'approximation et de détail.....	24
Figure 2.3: Décomposition en sous bande .....	26
Figure 2.4: Reconstruction sous bande .....	27
Figure 2.5: Le Schéma de décomposition reconstruction en sous bande .....	27
Figure 2.6: Décomposition de l'image en quatre sous bandes par l'algorithme pyramidal.....	28
Figure 2.7 : La décomposition pyramidale en deux niveaux de l'image Lena.....	29
Figure 2.8 : Principe de l'EMD .....	30
Figure 2.9 : Organigramme du Pseudo-code de l'EMD .....	34
Figure 2.10 : (A) Diagramme de Voronoi ; (B) Triangulation de Delaunay.....	37
Figure 2.11 : (A) Symétrisations des points à interpoler ; (B) Triangulation de Delaunay correspondante (le tracé en pointillés correspond au domaine initial).....	37
Figure 2.12 : a) image originale, b) premier IMF, c) second IMF, d) troisième IMF, e) quatrième IMF, f) premier résidu, g) second résidu, h) troisième Residu, i) quatrième résidu.....	38
Figure 3.1 : Image Lena 128*128.....	41
Figure 3.2 : Organigramme d'insertion.....	43
Figure 3.3 : Organigramme de la détection.....	45
Figure 3.4 : A gauche l'image originale, à droite l'image tatouée.....	46
Figure 3.5 : Variation de PSNR suivant la variation de $\alpha$ .....	47
Figure 3.6 : Marque insérée.....	47
Figure 3.7: Exemples pour la rotation d'image tatouée à droite rotation avec $60^\circ$ et à gauche rotation avec $25^\circ$ .....	50
Figure 3.8: Variation du taux de corrélation suivant l'angle de rotation pour les ondelettes.....	50

Figure 3.9: Variation du taux de corrélation suivant le facteur de compression pour les ondelettes.....	52
Figure 3.10: Variation du taux de corrélation suivant le facteur du bruit pour les ondelettes.....	53
Figure 3.11 : L'EMD pour l'image de Lena : (a) : Première IMF, (b) : Second IMF, (c) :Troisième IMF, (d) : Le résidu.....	54
Figure 3.12: A gauche image originale, à droite image tatouée.....	55
Figure 3.13: A gauche résidu originale, à droite résidu tatoué.....	55
Figure 3.14: Variation du taux de corrélation suivant l'angle de rotation pour l'EMD.....	57
Figure 3.15: Variation de corrélation suivant la variation du facteur de compression pour l'EMD.....	57
Figure 3.16 : Variation du taux de corrélation suivant le coefficient du bruit pour l'EMD.....	58
Figure 3.17: Banc de test.....	59

## Liste des tableaux

Page

Tableau 2.1 : Comparaison entre l'EMD et la transformée Fourier.....	29
Tableau 3.1 : Variation de PSNR suivant la variation de $\alpha$ .....	46
Tableau 3.2 : Variation de PSNR et Corrélation en fonction des différents filtres d'ondelettes.....	48
Tableau 3.3 : Variation du taux de corrélation suivant l'angle de rotation pour les ondelettes.....	49
Tableau 3.4 : Variation du taux de corrélation suivant le coefficient de translation pour les ondelettes.....	51
Tableau 3.5 : Variation du taux de corrélation suivant le facteur de compression pour les ondelettes.....	51
Tableau 3.6 : Variation du taux de corrélation suivant le facteur de bruit pour les ondelettes.....	52
Tableau 3.7 : Variation de PSNR et du taux de corrélation suivant la variation des IMFs et du résidu.....	54
Tableau 3.8 : Variation du taux de corrélation suivant l'angle de rotation pour l'EMD.....	56
Tableau 3.9 : Variation du taux de corrélation suivant le coefficient de translation pour l'EMD.....	56
Tableau 3.10 : Variation du taux de corrélation suivant le facteur de compression pour l'EMD.....	57
Tableau 3.11 : Variation du taux de corrélation suivant le facteur de bruit pour l'EMD.....	58
Tableau 3.12 : Tableau comparatif entre le tatouage basé sur les ondelettes et celui basé sur l'EMD.....	59
Tableau 3.13 : Variation du PSNR et du taux de corrélation suivant variation des images de test sans attaques.....	60
Tableau 3.14 : Les différentes valeurs coefficients des attaques acceptables pour chaque image de test.....	60

# *Résumé*

La technologie numérique rend la transmission, le stockage et la modification de documents multimédia beaucoup plus aisés qu'auparavant. Mais du fait de cette facilité, l'authentification et la gestion des droits d'auteur deviennent difficiles. Le tatouage robuste est une solution qui s'est beaucoup développée depuis une dizaine d'années. Il permet d'insérer au sein d'un document multimédia (document hôte) un message (identifiant d'auteur, signature numérique, . . .). Cette modification est peu perceptible afin de ne pas gêner l'exploitation normale du document marqué. De plus, l'algorithme d'extraction doit pouvoir retrouver le message malgré d'éventuelles modifications de l'hôte (attaques).

Dans le cadre de ce projet, on a implémenté deux algorithmes de tatouage des images numériques ; l'un basé sur les ondelettes et l'autre sur la BEMD.

On a effectué plusieurs tests de simulation. D'après les résultats obtenus on a pu conclure que l'algorithme basé sur la BEMD plus robuste que celui basé sur les ondelettes.

# Introduction Générale

# Introduction Générale

L'ère numérique que nous traversons depuis quelques années a permis un accès à l'information bien plus aisé que par le passé. Les documents numériques étant immatériels, leur diffusion est extrêmement rapide et peu coûteuse. Les réseaux et les supports numériques de forte capacité facilitent les échanges de documents.

Avec l'apparition de ces nouvelles technologies numériques, les fraudes se sont multipliées, soulignant le manque de méthodes concernant la protection des données numériques [1],[2]. Ces données sont en effet très faciles à pirater : on peut les stocker, les copier, les modifier et enfin les diffuser illégalement sans qu'elles perdent de leur qualité. Une image numérique, diffusée par exemple sur Internet, peut être aisément copiée puis rediffusée sur un réseau ou stockée sur CD-ROM sans prise en compte des droits d'auteurs.

Pour répondre à ces besoins, un nouvel axe de recherche se développe très rapidement : le tatouage ou watermarking. Le principe des techniques dites de tatouage d'images consiste en l'insertion d'une marque imperceptible dans l'image. Dans le cadre de la protection des droits d'auteurs, la marque insérée, appelée "signature", correspond au code du copyright. Ce type de tatouage doit répondre à des contraintes fortes en termes de robustesse. En effet, quelles que soient les attaques (licites ou illicites) que l'image tatouée subit, la marque doit rester présente tant que l'image reste exploitable. De plus, la présence de la marque ne doit être détectée que par des personnes autorisées (possédant une clef de détection privée). De nombreux algorithmes ont été présentés récemment et certains produits sont même commercialisés, cependant, aucun d'eux ne satisfait pleinement au cahier des charges idéal.

Le travail présenté dans ce projet a pour objectif de proposer deux différents systèmes de tatouage des images numériques ; le premier basé sur la décomposition en ondelettes (en anglais Discrete Wavelet Transform, ou DWT) qui ont été développées dans

les années 80. Elles ont eu un grand succès dans les domaines qui traitent l'information grâce à sa caractéristique spécifique (localisation espace -fréquence). Le second système de tatouage est basé sur la décomposition modale empirique (EMD); une méthode algorithmique de décomposition spectrale adaptative : au lieu d'analyser le signal dans une base fixe comme avec Fourier, on construit au fur et à mesure les fonctions de base.

Dans le cadre de ce travail, notre étude porte sur ces deux approches et l'objectif est de développer et implémenter ces méthodes de tatouage dans les deux cas : insertion et détection. En plus d'étudier la robustesse des ces deux techniques contre des différents attaques appliquées.

Pour ce faire, le mémoire est organisé comme suit : dans le premier chapitre, nous donnerons un état de l'art et des notions générales sur les images numériques et les systèmes de tatouage, nous exposerons les différentes composantes d'un tel système. Ensuite dans le second, nous présenterons en détail les algorithmes des méthodes utilisées pour le tatouage dans cette étude. Et enfin, dans le troisième chapitre on présentera les résultats obtenus après l'évaluation des méthodes implémentées et on terminera par une conclusion générale et des perspectives.

# *Chapitre I*

## I. Introduction

Le tatouage des données numériques est une discipline récente qui trouve son origine dans le manque de techniques fiables de protection de ce type de données. En effet, associé à d'autres techniques, cet axe de recherche a pour but de résoudre des problèmes aussi variés que la protection du copyright et des droits d'auteurs, la réglementation des copies, la prévention de la redistribution non autorisée, le suivi de documents et l'intégrité du contenu d'une donnée. Afin de mieux comprendre le principe de cette technique dans ce chapitre et en donnant quelques définitions de base sur les images numériques, nous présenterons un état d'art sur le tatouage des images numériques.

## II. Définition d'image

L'image est une représentation d'une personne ou d'un objet par la peinture, la sculpture, le dessin, la photographie.... Quelque soit son origine, une image constitue une représentation d'un univers composé d'entités : objets dans une scène, organe de corps humain...etc.

L'image peut être décrite sous forme d'une fonction  $I(X, Y)$  de brillance analogique continue, définie dans un domaine borné, tel que  $X$  et  $Y$  sont les coordonnées spatiales d'un point de l'image, et  $I$  une fonction d'intensité lumineuse et de couleur. Sous cet aspect, l'image est inexploitable par la machine, ce qui nécessite sa numérisation .

### 2.1. Image numérique

Contrairement aux images obtenues à l'aide d'un appareil photo, ou dessinées sur du papier, les images manipulées par un ordinateur sont numériques (représentées par une série de bits) [2]. L'image numérique est l'image dont la surface est divisée en éléments de tailles fixes appelés cellules ou pixels, ayant chacun comme caractéristique un niveau de gris ou de couleurs prélevé de la scène à représenter. La numérisation d'une image est la conversion de celle-ci de son état analogique (distribution continue d'intensités lumineuse dans un plan  $(X, Y)$ ) en une image numérique représentée par une matrice bidimensionnelle de valeurs numérique  $f(x, y)$  où :

$x, y$  : coordonnées cartésiennes d'un point de l'image.

$f(x, y)$  : niveau de gris en ce point.

## 2.2. Les types des images numériques

Il existe différentes catégories d'image selon le nombre de bit sur lequel est codée la valeur de chaque pixel, on trouve :

- **Images binaires (noir et blanc)** : un pixel peut prendre uniquement les valeurs noir et blanc. C'est typiquement le type d'image que l'on utilise pour représenter les images textes et plans.
- **Images niveaux de gris** : le niveau de gris est la valeur de l'intensité lumineuse en un point. La couleur du pixel peut prendre des valeurs allant du noir au blanc en passant par un nombre fini de niveaux intermédiaires. Donc pour représenter les images aux niveaux de gris, on peut attribuer à chaque pixel de l'image une valeur correspondante à la quantité de la lumière. Cette valeur peut être comprise par exemple entre 0 et 255. Chaque pixel n'est donc plus représenté par un bit, mais par un octet.
- **Images en couleurs** : même s'il est parfois utile de pouvoir représenter des images en noir et blanc, les applications multimédias utilisent le plus souvent des images en couleurs. La représentation des couleurs s'effectue de la même manière que pour les images monochromes avec cependant quelque particularité. En effet, il faut tout d'abord choisir un modèle de représentation. On peut représenter les couleurs à l'aide de leurs composantes primaires. Les systèmes émettent de la lumière (écran d'ordinateur,...) sont basés sur le principe de la synthèse additive : les couleurs sont composées d'un mélange de rouge, vert et bleu (modèle R.V.B). Il existe d'autres systèmes de représentation de la couleur comme le YCbCr, mais dont la plus part sont en relation linéaire avec le RGB.

## III. Le tatouage des images numériques

### 3. 1. Définition

Le tatouage numérique ou watermarking est une technique permettant d'ajouter des informations de copyright ou d'autres messages de vérification à un fichier ou signal audio, vidéo, une image ou un autre document numérique. Le message caché dans le signal hôte, le plus souvent nommé marque ou bien simplement message, est un ensemble de bits, dont le contenu dépend de l'application [2]. La marque peut être le nom ou un identifiant du créateur, du propriétaire, de l'acheteur ou encore une forme de signature décrivant le signal hôte. Le nom de cette technique provient du marquage des documents papier et des billets.

Les applications du tatouage sont multiples, il peut s'appliquer au copyright, à la prévention de copier, à la distinguer la falsification .

### 3. 2. Historique

Le tatouage numérique est une discipline particulièrement récente, dont on fait remonter l'apparition en 1990 avec l'article de Tanaka et al. Sur une méthode pour cacher de l'information dans une image, ainsi qu'avec les articles de Caronni et Tirkel et al en 1993.

Le terme digital watermark (tatouage numérique) fut pour la première fois employé en 1992 par Andrew Tirkel et Charles Oslimite. En réalité, le terme utilisé par Tirkel et Oslimite est venant du Japon : Denshi Sukashi qui se traduit en anglais par electronic watermark. Paul Levinson parle aussi de tatouage numérique [2].

Le tatouage est généralement confondu avec la cryptographie et la stéganographie mais en fait sont des techniques très proches les unes des autres puisqu'elles consistent à transmettre une information à caractère confidentielle. Elles répondent toutes les trois à des problèmes de sécurité. Cette section vise à établir les différences et les similitudes entre ces trois disciplines.

- **La cryptographie** : la cryptographie est une discipline très vieille, des techniques ont été mises en place dès le V<sup>ème</sup> siècle avant JC. Elle consiste à transformer un message pour qu'il devienne illisible. Seule la connaissance d'une clef et du moyen de cryptage peut permettre de décoder le message afin de le rendre lisible. Alors que pour le tatouage, la donnée tatouée est disponible, diffusée et exploitable, la donnée cryptée est elle inexploitable sans la connaissance des clés de déverrouillage de l'algorithme de cryptage. En fait les deux disciplines sont considérées comme complémentaires puisque d'un coté la cryptographie tend à renforcer le contrôle d'accès aux données, leur authenticité et leur intégrité, d'un autre coté le tatouage tend à lier le contenu des données avec des informations auxiliaires [2].
- **La stéganographie** : le terme stéganographie vient du mot Grec steganos signifiant caché et de graphia signifiant écriture, littéralement on traduit par écriture cachée .Elle consiste à dissimuler un message dans un autre. Ainsi, seule la personne connaissant le procédé de dissimulation peut lire le message caché. Contrairement à la cryptographie, la stéganographie est "invisible".

La différence entre la stéganographie et le tatouage, est que dans la stéganographie, l'existence d'un message caché doit rester secrète alors que pour le tatouage seul le message doit rester caché mais son existence (tant qu'on ne peut le détecter) peut être connue.

#### **IV. Types de tatouage**

Le terme tatouage (watermarking), c'est-à-dire, on voudrait parler de l'information que l'on a insérée aux objets.

Il existe plusieurs formes de l'information : une séquence de binaire aléatoire, une petite image... Selon la visibilité de la marque, on peut classifier le tatouage en deux types : tatouage visible ou bien perceptible et tatouage invisible ou imperceptible [3].

##### **4. 1. Tatouage visible**

Dans ce type de tatouage, on peut observer bien la marque dans l'image. Bien sûr que c'est clairement de permet d'une authenticité de la propriété de l'image. Il est utilisé plus dans les applications non commerciales.

Les marques visibles altèrent le signal ou le fichier (par exemple ajout d'une image pour en marquer une autre). Par exemple, il est fréquent que les agences de photo ajoutent un tatouage visible en forme de copyright aux versions de prévisualisation (basse résolution) de leurs photos.

##### **4. 2. Tatouage invisible**

Dans ce type, on n'observe pas l'existence de la marque. En conséquence, elle n'affecte pas la qualité de l'image et l'image elle-même a encore sa qualité commerciale.

Les tatouages invisibles modifient le signal d'une manière imperceptible par l'utilisateur final (par exemple quelques bits ajoutés à une image mais ne modifiant que les derniers octets significatifs). Le tatouage numérique invisible peut être considéré comme une forme de stéganographie, puisque l'utilisateur final ignore la présence du tatouage et donc de l'information cachée. Pour reprendre l'exemple de l'agence photo, les photos hautes résolutions vendues par l'agence possèdent elles au contraire un tatouage invisible, qui ne dégrade donc pas le contenu visuel, mais qui permet de détecter l'éventuelle source d'un vol. Le message caché par le tatouage peut être un identifiant de l'acheteur par

exemple. En cas d'utilisation non-autorisée, l'agence peut alors se retourner contre l'acheteur [3].

### 4. 3. Tatouage fragile

Il existe aussi des tatouages dits fragiles. Ce sont des tatouages invisibles, qui sont utilisés pour détecter toute modification du signal, par exemple pour vérifier que le contenu n'a pas été modifié par un tiers.

## V. Schéma général d'un système de tatouage

Généralement on peut décomposer un schéma classique de tatouage des images en deux étapes fondamentales : phase d'insertion et phase de détection [1].

**a. Phase d'insertion :** La figure 1.1 présente le schéma général d'implémentation de la marque. L'insertion de la marque dans une image hôte  $I$  permet d'obtenir une image tatouée notée  $I_w$ . L'espace d'insertion  $T(I)$  peut être le domaine spatial ou bien le résultat d'une transformation réversible qui facilite l'insertion comme la Transformée en Cosinus Discrète (TCD), la Transformée de Fourier Discrète (TFD) ou encore une Transformation par Ondelettes (TOD). La marque insérée  $W$ , également désignée sous le terme de signature ou de tatouage, dépend d'une clé secrète  $K$  mais aussi du message que l'on désire insérer. Cette signature peut être une séquence pseudo aléatoire possédant certaines propriétés (distribution gaussienne ou uniforme), une donnée binaire  $\{-1, +1\}$  ou bien une petite image (logo) [1].

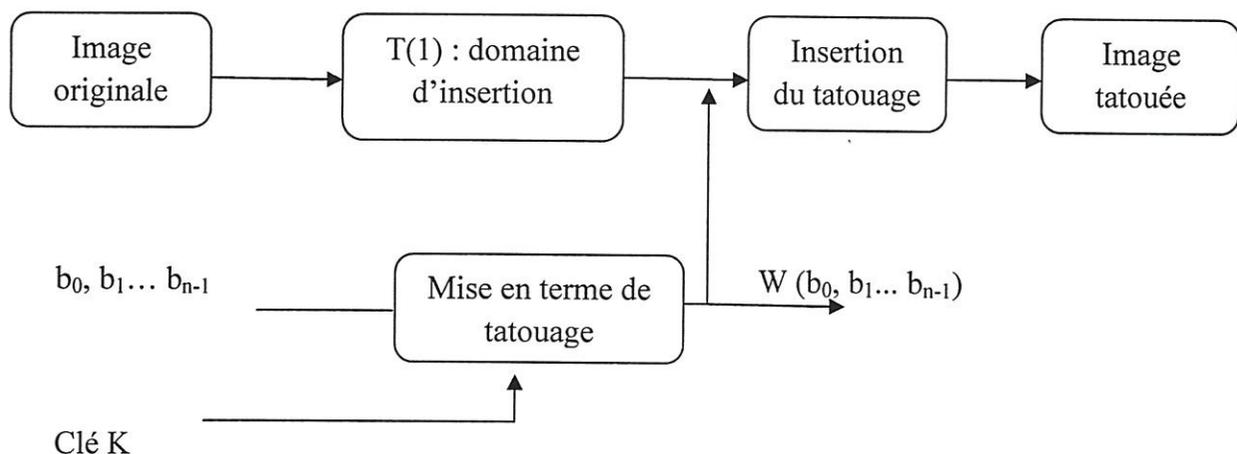


Figure 1.1 : Schéma général du processus d'insertion d'une signature.

**b. phase de détection** : la détection de la signature  $W$  et l'extraction du message  $m$  incorporé ont pour rôle d'attester si la signature est ou non présente dans l'image. Si la signature est présente, le message qui lui est associé peut ensuite être décodé [1].

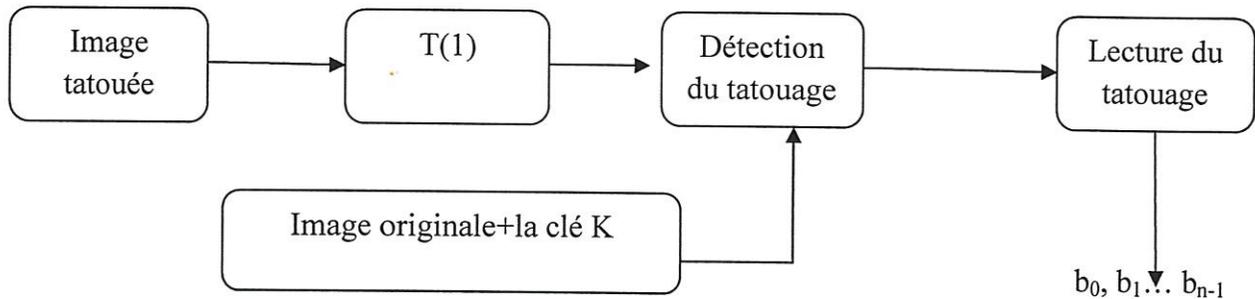


Figure 1.2 : Schéma général du processus de détection d'une signature.

Selon les différents algorithmes, l'image originale et la clé secrète peuvent être ou non nécessaires lors de la détection. Nous allons ici énumérer et caractériser ces différents processus :

- **Les schémas non-aveugles** : La détection est dite "non-aveugle" si l'image originale et la clé secrète (privée) sont nécessaires.
- **Les schémas semi-aveugles** : Une détection "semi-aveugle" n'utilise pas l'image originale, mais elle se base sur quelques caractéristiques dérivées de cette dernière.
- **Les schémas aveugles** : c'est le cas où l'image originale n'est pas disponible pendant le processus d'extraction, si la clé privée est aussi absente la détection est dite à clé publique.
- **Les schémas asymétriques** : la détection par algorithmes asymétriques peut être schématisée comme une détection aveugle, ces algorithmes utilisent des clés différentes pour insérer et détecter la marque.

D'une manière générale, la robustesse d'un schéma "non-aveugle" est plus importante que celle d'un schéma "aveugle". L'image originale fournit une référence pouvant servir à améliorer l'estimation de la signature ou encore à identifier les divers traitements subis par l'image tatouée.

## **VI. Contraintes d'un schéma de tatouage efficace**

Pour être performant et efficace, le tatouage doit vérifier quatre critères :

### **6.1. Invisibilité**

Le tatouage doit être imperceptible, c'est à dire qu'un utilisateur quelconque ne doit pas pouvoir différencier visuellement l'image tatouée de l'image originale.

Cette propriété est importante pour deux raisons. La première est évidente : le tatouage ne doit pas empêcher la compréhension de l'œuvre, celle-ci doit garder toute sa qualité commerciale. Une autre raison est, qu'ainsi cachée, la marque est plus difficilement détruite par piratage. Dans la plupart des algorithmes proposés, l'imperceptibilité du tatouage s'obtient en utilisant diverses propriétés du Système Visuel Humain (SVH). Ces propriétés, souvent trouvées à partir d'heuristiques, proposent des modélisations du comportement psycho-visuel humain. L'utilisation de ces propriétés tend de plus en plus à se généraliser pour insérer une quantité d'information importante tout en gardant la marque invisible [5].

### **6. 2. Sécurité**

Comme dans toutes les disciplines proches de la cryptographie, la sûreté du système est assurée uniquement par la confidentialité de la clef secrète. Si cette clef est inconnue, aucun utilisateur ne doit pouvoir retrouver l'image originale. Cette contrainte est souvent remplacée par la suivante, plus réaliste : Ne connaissant pas la clef secrète, un pirate ne doit pas pouvoir retrouver l'image originale sans pour cela mettre en œuvre des moyens plus coûteux que ceux correspondant à l'achat des droits de copyright [5].

### **6. 3. Robustesse**

C'est l'un des critères les plus difficiles à vérifier. En effet beaucoup d'attaques permettent aujourd'hui de modifier l'image de telle sorte qu'on ne puisse plus y déceler la signature du propriétaire. Ces techniques utilisées pour le piratage combinent notamment les transformations géométriques, la compression, les filtrages divers et attaques de type cryptographique [2].

## 6. 4. Capacité

C'est la quantité d'information (bits de tatouage) que l'on peut cacher au sein du média (image ou vidéo). Il paraît évident que plus on augmente la capacité, plus la signature sera perceptible.

## VII. Techniques de tatouage

Les schémas de tatouage des images que l'on peut rencontrer dans la littérature scientifique sont très variés et peuvent sembler à première vue très différents les uns des autres. Cependant, les techniques de tatouage courantes peuvent être groupées selon :

### a) Le domaine sur lequel ils agissent en trois classes principales [2] :

- Les techniques spatiales.
- Les techniques fréquentielles et multi-résolutions.
- Les techniques fondées sur le contenu.

### b) La façon dont la marque est insérée, on distingue deux grands ensembles :

- Les techniques additives et d'étalement du spectre.
- Les techniques substitutives et de quantification non linéaire.

## 7. 1. Classification selon le domaine d'insertion

Un des points clefs dans un algorithme de tatouage est l'espace d'insertion utilisé pour insérer la signature.

**a. le domaine spatial :** cette approche consiste en la modification directe des pixels de l'image. Afin d'assurer l'invisibilité de la signature, cette modification doit rester limitée. Une des toutes premières approches utilisée consiste à insérer les bits du message dans les bits de poids faible de chaque pixel (least significant bits, LSB). Une autre approche, appelée patchwork, est la modification des propriétés statistiques de petites régions de l'image, comme la moyenne ou l'écart-type, le message étant représentée par exemple par la différence des ces propriétés entre deux régions adjacentes. On peut aussi inclure dans cette catégorie les techniques consistant à encoder le message dans l'histogramme de

l'image, en modifiant les valeurs des pixels en conséquence. Ou bien le tatouage  $w$  peut être tout simplement ajouté aux pixels de l'image, avec une faible intensité. L'inconvénient des méthodes appliquées au domaine spatial est qu'elles sont en général peu robustes [6].

**b. le domaine fréquentiel :** les schémas qui utilisent le domaine fréquentiel comme domaine d'insertion peuvent être davantage robustes face aux opérations de compression puisqu'ils utilisent le même espace que celui qui sert au codage de l'image. D'autre part, grâce aux algorithmes de transformations rapides, le calcul de la transformée d'une image est devenu peu coûteux.

Il existe de nombreuses transformées, celles qui sont le plus couramment utilisées sont les suivantes :

- **La transformée de Fourier discrète:** Cette dernière a largement été étudiée en tatouage puisqu'elle offre la possibilité de contrôler les fréquences du signal. Cela permet de choisir de façon adéquate les parties de l'image qui devront être marquées, afin d'obtenir un bon compromis entre visibilité et robustesse. Cette transformation est également utilisée pour fusionner la signature avec le médium, dans la phase de modulation, mais aussi utilisée pour diviser les images en bandes perceptuelles [6].
- **La transformée en cosinus discrète:** Les règles de marquage opérant dans le domaine DCT sont souvent plus robustes à la compression JPEG et MPEG. Le créateur de signatures peut ainsi prévenir ces attaques plus facilement. De plus, les études menées concernant les distorsions visuelles sur la source à coder, contribuent à une meilleure prédiction de l'impact visuel d'une signature sur le médium. Enfin, insérer une signature dans le domaine compressé permet de réduire les temps de calcul.
- **La transformée de Mellin Fourier:** La plupart des algorithmes de marquage rencontrent des problèmes lors de l'extraction de la signature, après que l'image tatouée ait subi une transformation géométrique affine. Or, la transformée de Mellin Fourier est basée sur la propriété de translation de la transformée de Fourier, qui mentionne que seule la phase est altérée par une translation. En restreignant l'espace de marquage à l'amplitude de la transformée de Fourier, le support de la signature devient insensible à toute translation de l'image [2].

**c. le domaine multi résolution** : le domaine multi résolution (Ondelettes) est un espace de tatouage intéressant car il est utilisé dans de récents standards de compression comme JPEG2000 ou encore MPEG4. La décomposition d'une image en sous-bandes permet d'en isoler les composantes basse fréquence. Celles-ci constituent un espace d'insertion qui est moins sensible que l'image elle-même. Le contenu spatial de l'image est aussi conservé après une transformation multi résolution, ce contenu peut alors servir à localiser la signature après une transformation géométrique [1].

## 7.2. Les méthodes additives

Les méthodes additives sont les plus nombreuses et consistent principalement à ajouter un bruit à l'image. La figure 1.3 montre le schéma complet d'une méthode additive. La première étape est la génération d'une marque  $W_0$  qui est composée d'un bruit blanc  $bb$  de générateur  $K$  modulant parfois un message  $M$ . La seconde étape est la pondération de cette marque par un facteur  $\alpha$  issu du calcul d'un masque psychovisuel  $Ma$ . La troisième étape est l'addition de la marque à l'image. Cette incrustation peut se faire directement sur l'image  $I$  (dans le domaine spatial) ou sur une transformée  $Tr$  de celle-ci (TFD, TCD, TOD,...etc.) pour obtenir l'image tatouée  $I^*$  [3].

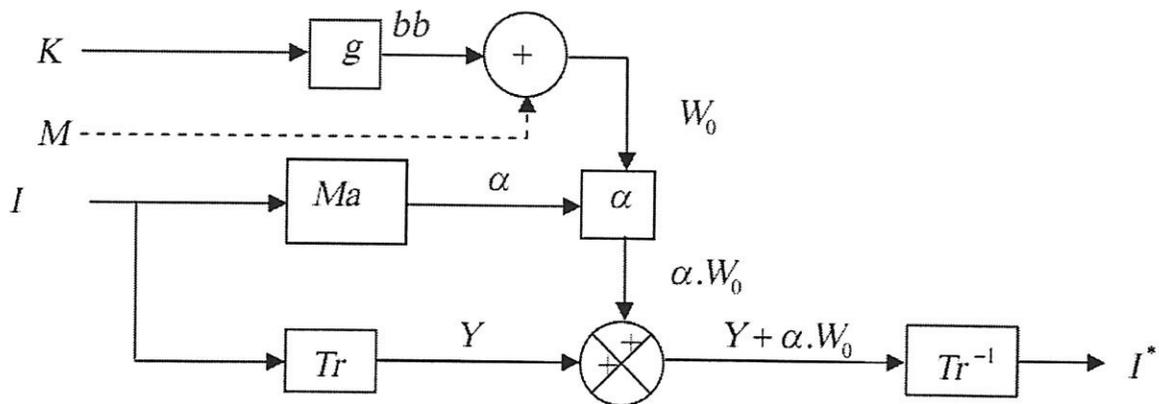


Figure 1.3 : Schéma de tatouage d'une méthode additive.

▪ **Insertion par l'étalement de spectre** : La méthode par excellence, et aussi la plus efficace, utilisée dans le cadre d'un tatouage additif est l'étalement de spectre (Spread Spectrum). Elle fut présentée pour la première fois par Frank Hartung et Bernd Girod [7] pour le tatouage de vidéo compressée ou non. Le principe est simple repose sur le fait que le message a tatoué est un signal basse fréquence composée d'une suite de 0 et de 1.

Son spectre est donc à bande étroite, et par conséquent assez sensible aux perturbations que représente le document hôte. Une solution consiste donc à moduler ce message par une séquence aléatoire large bande (particulièrement haute fréquence) et à l'ajouter ensuite à l'hôte. Ainsi, le message rajouté est très résistant aux perturbations provoquées par le document hôte. Il suffit ensuite à la réception d'effectuer une corrélation du document tatoué avec la séquence aléatoire utilisée pour la modulation. S'il y a corrélation, c'est qu'il y a un message tatoué. Sinon, il n'y en a pas.

Pour insérer une séquence de bit dans chaque image, Hartung et Girod [8] associe à chaque bit une valeur +1 ou -1. Puis, chacun des ces bits est étalé sur une fenêtre, généralement sur une ligne complète. Le message occupe alors une taille identique à l'image. Il est alors modulé par une séquence aléatoire, et le résultat, de même taille que l'image donc, est ajouté à l'image hôte. A la réception, le décodage se fait par corrélation avec la même séquence aléatoire utilisée pour la modulation. Si la corrélation est proche de 1, c'est qu'il y a une valeur +1 tatouée. Si elle est proche de -1, c'est une valeur -1 qui est tatouée. Sinon, elle est proche de 0 et donc aucune valeur n'a été tatouée.

L'avantage de cette méthode est une grande robustesse aux déformations et bruit pouvant perturber le document tatoué. Pour augmenter les performances à la détection, il est même possible d'utiliser un filtre passe-haut afin de faire ressortir le tatouage et éliminer le maximum de composantes du document hôte. Le principal inconvénient par contre, est la capacité de tatouage très réduite pour ce genre de méthode. En effet, le document hôte est considéré comme source d'interférences et une partie de la capacité est perdue pour résister à ces interférences. De plus, l'encodage se fait de manière indépendante de l'hôte, d'où une capacité avec état non connu définie par Shannon. Du point de vue visuel, le résultat est assez efficace, car la modulation par une séquence proche d'un bruit blanc passe bien inaperçue à peu près partout, sauf dans les sections uniformes. Pour cela, Hartung et Girod utilise un modèle psychovisuel simple qui n'effectue de tatouage que dans les parties les moins uniformes.

▪ **Tatouage additif dans le domaine multirésolution (Ondelettes)** : les auteurs proposent un schéma d'insertion additif dans l'espace obtenu à partir de la décomposition de l'image en trois niveaux de résolution. La signature est une séquence de nombres pseudo-aléatoires gaussiens [2]. La longueur de la séquence dans la sous-bande d'approximations LL est fixée à 500. Dans les sous-bandes de détails restantes, 4500

coefficients sont modifiés. La signature est ajoutée aux coefficients de grandes valeurs dans chaque sous-bande, excepté les trois sous-bandes de détails de la décomposition ( $LH_1, HL_1, HH_1$ ).

### 7.3. Les méthodes substitutives

La classe des schémas substitutifs peut être représentée par des schémas où la signature n'est pas ajoutée mais substituée des composantes de l'image [7]. Une clé secrète  $K$  associée à un générateur aléatoire permet de sélectionner les différentes composantes  $C_K(I)$  de l'image. Ces composantes peuvent désigner les pixels d'une image, ou une transformée de celle-ci (TCD, TFD,...etc.). La signature à insérer est obtenue en appliquant une contrainte (par exemple : un critère de similarité ou une relation d'ordre) sur  $C_K(I)$  en fonction du message à insérer. On procède ensuite à l'étape de substitution. L'image tatouée  $I^*$  est reconstruite à partir des composantes propres à la signature (figure 1.4). La détection de la signature s'effectue en comparant le degré de similitude entre le message retrouvé à partir des composantes extraites de l'image tatouée  $C_K(I)$  et le préambule utilisé lors de l'insertion. Dans ce qui suit, on cite quelques travaux concernant de type de méthodes.

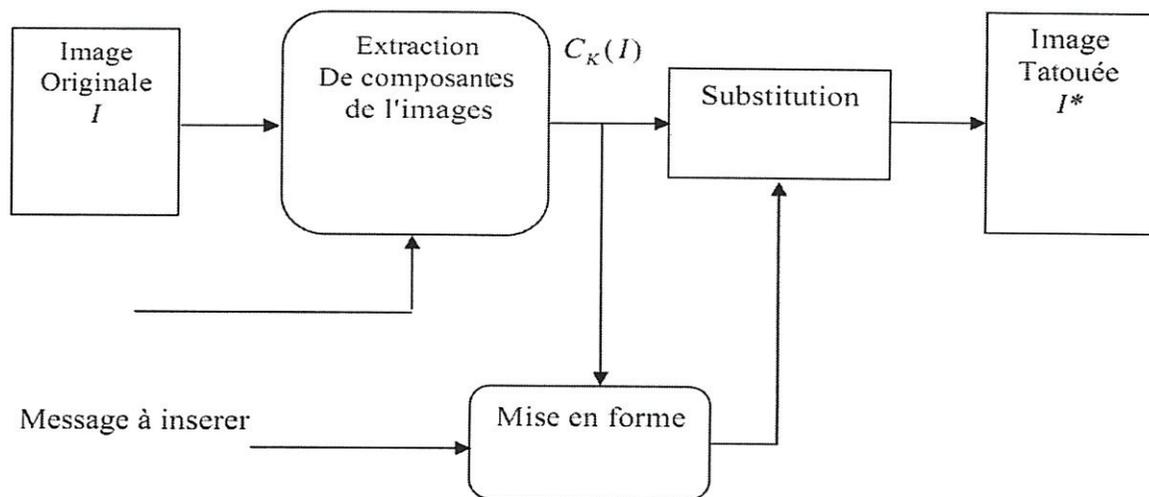


Figure 1.4 : Principe de l'insertion par Substitution.

▪ **Modification des coefficients TCD** : Zhao et Koch [9] sont parmi les précurseurs des schémas de tatouage par substitution. Le principe de leur méthode consiste à calquer la méthode de compression JPEG, qui utilise la transformée cosinus discrète. La méthode sera alors robuste à cette transformée très répandue. L'image est décomposée en blocs de pixels  $8 \times 8$ , dont certains sont choisis par la clef  $K$  pour porter le message. Les blocs sont ensuite transformés par DCT, puis les modifications se font sur un triplet (déterminé lui aussi par la clef) de coefficients basses fréquences ( $C_1$ ;  $C_2$ ;  $C_3$ ). Par souci d'invisibilité, on ne modifiera jamais les trois coefficients des plus basses fréquences. Le triplet modifié doit respecter des contraintes d'ordre différentes selon que la marque à implanter  $W$  porte le bit 0 ou 1 :

$$C_1 > C_3 + C_{te} \quad \text{et} \quad C_2 > C_3 + C_{te} \quad \text{si} \quad w_i = 1$$

$$C_1 + C_{te} < C_3 \quad \text{et} \quad C_2 + C_{te} < C_3 \quad \text{si} \quad w_i = 0$$

▪ **Quantification par modulation d'index (QIM)** : La méthode la plus populaire de tatouage substitutif est sans conteste la très récente quantification par modulation d'index (Quantization Index Modulation) présentée par Brian Chen et Gregory W. Wornell [10]. Le principe consiste à quantifier le document hôte en utilisant un ensemble de quantificateurs indexés par le message à transmettre. Ainsi, à chaque message est associé un quantificateur différent, et le tatouage s'effectue par quantification du document hôte avec le quantificateur correspondant au message à transmettre.

#### 7.4. Techniques de deuxième génération

Les techniques de tatouage de première génération (1GW : First Generation Watermarking) ont été principalement focalisées sur l'application du tatouage sur l'image entière. Cependant, cette approche n'est pas compatible avec les nouvelles normes de compression d'image vidéo JPEG2000 et MPEG4/7, parce que ces dernières sont basées sur les régions ou des objets de l'image/vidéo. En outre, les algorithmes de la première génération proposés jusqu'ici ne répondent pas aux contraintes de tatouage.

Le tatouage de la deuxième génération (2GW : Second Generation Watermarking) a été développé afin d'augmenter la robustesse et l'invisibilité. Les

méthodes de deuxième génération 2GW tiennent compte des caractéristiques de l'image (points, régions, contours et objets) et présentent des avantages additionnels en termes de détection et de recouvrement à partir des attaques géométriques par comparaison aux méthodes de première génération. Ceci est réalisé par l'exploitation des caractéristiques de l'image. En 2000, ICIP (International Conférence on Image Processing) a organisé une session spéciale sur les algorithmes de tatouage de deuxième génération pour fournir aux chercheurs l'opportunité de présenter les derniers résultats de la recherche sur le tatouage de deuxième génération [2].

Bas [5] propose une approche de tatouage basée sur le contenu des images. La synchronisation de la signature s'effectue par l'utilisation du contenu de l'image pour apporter des repères. Pour orienter l'insertion de la signature et permettre de la retrouver après une transformation géométrique, des ensembles de trois points, représentés par des triangles sont utilisés. Pour obtenir des points liés à l'image, le détecteur de points d'intérêts de Harris est utilisé. L'insertion de la signature s'effectue ensuite sur chacun des triangles dans le domaine spatial ou fréquentiel.

## VIII. Les applications de tatouage

Le tatouage s'applique sur des données numériques de n'importe quel type (textes, audio, vidéo, images, etc.). Les applications découlent des utilisations possibles de la signature :

- **Protection des droits d'auteurs** : il est possible d'ajouter l'auteur et la date de création dans une œuvre. Ensuite, une personne sait à qui donner les droits d'utilisation du document.
- **Vérification du contenu** : il est possible d'ajouter un tatouage pour l'utiliser comme une marque. Si ce tatouage existe au moment de l'expertise cela démontre que le document n'a subi aucune modification.
- **Surveillance** : il est possible qu'un annonceur de publicité tatoue sa bande annonce. Il pourra alors vérifier que sa publicité passe au moment voulu et le nombre de fois voulu.

## **IX. État de l'art des attaques sur les schémas de tatouage d'images**

Les attaques tiennent une place très importante dans le cahier des charges d'un processus de tatouage puisqu'elles définissent sa robustesse. Les principales classifications dans la littérature scientifiques ont été présentées par Voloshinovskiy [3]. Classiquement, on peut séparer les attaques de la manière suivante :

- **Les attaques non-intentionnelles** : ce sont les traitements usuels de l'image comme la compression, le filtrage, la conversion A/N...etc. ces attaques ne visent pas forcément à supprimer la signature, l'identifier ou l'isoler.
- **Les attaques intentionnelles** : ces attaques visent à supprimer ou à dégrader la signature insérée comme l'attaque jitter qui consiste à enlever des lignes et des colonnes de l'image tatouée et à en dupliquer d'autres.

### **9.1. Attaques non intentionnelles**

Nous parcourons un éventail des différentes techniques utilisées en traitement d'images qui sont susceptibles d'altérer la détection de la signature.

#### **a) Les techniques de compression**

Les algorithmes de compression sont particulièrement dangereux pour les processus de tatouage puisque leur objectif est exactement l'opposé de celui du tatouage. On veut en effet, par l'utilisation de ces algorithmes ne garder de l'image que les composantes basse-fréquence essentielles à leur compréhension (une signature invisible n'est évidemment pas essentielle). Si un algorithme de tatouage veut être robuste aux schémas de compression, il doit posséder une composante basse-fréquence qui sera conservée après la compression .

#### **b) Les opérations de rehaussement, de lissage**

Le rehaussement des images s'effectue en augmentant les composantes hautes fréquences de l'image [5]. Les composantes hautes fréquences de la signature sont alors accentuées. Le lissage des images atténue la composante haute fréquence de l'image qui devient alors plus floue. Les composantes hautes fréquences de la signature sont dégradées.

**c) Les transformations géométriques usuelles**

L'édition des images nécessite constamment de modifier leur géométrie, on peut vouloir effectuer un fenêtrage, un changement d'échelle, un zoom, une translation, ou encore appliquer une rotation sur l'image. Ces transformations géométriques désynchronisent dans la plupart des cas le détecteur qui ne retrouve plus la signature (bien que celle-ci soit présente).

**d) Les conversions analogiques/numériques**

La numérisation de l'image à l'aide d'un scanner par exemple peut provoquer de légères déformations géométriques. Ce procédé va donc à la fois dégrader la signature et provoquer une perte de synchronisation de la signature.

**9.2. Les attaques intentionnelles.**

Les attaques les plus pénalisantes dans cette situation sont celles qui visent à désynchroniser la marque avant la phase de détection. L'attaque est dite efficace lorsque la signature est indétectable ou lorsque la décision au sujet de l'authenticité de la signature est ambiguë.

**a) Attaque par copiage**

L'attaque par copiage consiste à recopier une marque obtenue préalablement (par exemple par estimation) sur une image non marquée. Le détecteur validera alors la nouvelle image comme étant tatouée. Cette attaque s'applique naturellement aux problèmes d'intégrité, puisqu'elle rend possible la présentation de faux qui seront authentifiés par le détecteur.

**b) Attaque "jitter"**

Elle consiste à inverser, à supprimer ou à remplacer certaines lignes ou colonnes de l'image numérique. Cette attaque est très efficace face à des schémas de type étalement de spectre [2].

**c) Attaque "mosaïque "**

Elle consiste à diviser l'image en différentes parties. A cause de la division, la détection ne pourra pas être effectuée sur toute l'image mais seulement sur les parties séparées de l'image. Elle permet d'invalider la détection sans pour autant supprimer la marque.

**d) Attaque "random bending"**

Elle consiste à appliquer des déformations géométriques aléatoires sur l'image tatouée. Des petits seuillages sont effectués sur les zones planes de l'image pour dégrader la marque dans ces zones.

**e) Attaque "sur marquage"**

L'attaque par sur marquage vise à tatouer à nouveau une image déjà tatouée. Pour certains schémas, en particulier si les lieux de tatouages sont fixés, cette attaque peut être très dangereuse [5].

## **X. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté le contexte technique qui entoure le domaine du tatouage d'image numérique. Contrairement à de nombreux domaines scientifiques, le tatouage est associé à un éventail extrêmement large de contraintes. Le "cahier des charges" n'est pas figé, et il est donc impossible de certifier qu'un algorithme puisse faire face à toutes les contraintes possibles. Chaque année, des chercheurs proposent à la fois des schémas appelés "robuste" mais aussi de nouvelles attaques permettant d'ôter la robustesse d'autres schémas.

# *Chapitre II*

## I. Introduction

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, un algorithme de tatouage robuste et efficace doit prendre en compte trois critères essentiels : l'invisibilité de la signature, la robustesse face aux divers attaques (intentionnelles et non intentionnelles) lors de la détection et la sécurité du schéma pour assurer la confidentialité de l'information cachée. Donc, pour construire un algorithme de tatouage efficace, il faudra dans le meilleur des cas combiner les trois aspects (invisibilité, sécurité et robustesse) et parfois faire des compromis. Dans ce contexte, nous avons opté dans notre travail pour la conception d'un schéma de tatouage qui répond à ces trois contraintes. Pour ce faire, nous avons proposé deux schémas utilisant les ondelettes, l'EMD ainsi que l'outil mathématique SVD. Dans ce chapitre nous allons détailler ces techniques avant de les utiliser dans nos algorithmes de tatouage.

## II. Analyse spectral

Le principe fondateur de l'analyse dans le domaine des fréquences est l'analyse de Fourier [6]. Il s'agit de décomposer une fonction périodique  $f$  sur la base des exponentielles. Pour une fonction non périodique, on utilise la transformée de Fourier, qui fournit un spectre continu. Mais, si l'analyse de Fourier est performante pour des fonctions périodiques, ou suffisamment régulières, notamment grâce à la FFT (Fast Fourier Transform), elle engendre de gros calculs pour des fonctions insuffisamment régulières. C'est pourquoi on a vu apparaître de nombreuses autres méthodes de décomposition spectrale. La plus intuitive de ces méthodes est la transformée de Fourier à fenêtre glissante pour des fonctions  $L^2$  : On choisit une fenêtre  $\omega$  centrée en 0 (Une Gaussienne, un triangle...). On peut alors écrire :

$$W_f(\lambda, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \omega(t - b) e^{-2i\pi\lambda t} dt \quad (2.1)$$

Cela revient à calculer la transformée de Fourier du signal  $f$  convolée avec la fenêtre  $\omega$  centrée en  $\lambda$ . Cette méthode, plus fine que la transformée de Fourier simple, ne prend cependant pas en compte les caractéristiques du signal. D'autres décompositions existent, qui recherchent d'autres bases que les exponentielles. Ainsi, la décomposition en modes principaux construit une base optimale, qui dépend du signal, et ou les premières

composantes contiendront presque toute l'énergie ; pour cela, on décompose notre signal sur une base connue, avant de réaliser une analyse en composante principale.

Parmi les décompositions les plus connues, on peut citer deux méthodes de décompositions ; tel que les ondelettes et la décomposition modale empirique.

### III. La transformée ondelettes

La transformée ondelettes (en anglais Wavelet Transform) ont été développées dans les années 80, elles ont eu un grand succès dans les domaines qui traitent l'information (Spécialement domaine de traitement d'image), surtout après avoir été utilisées par la nouvelle norme de compression JPEG2000. Elles sont devenues un outil privilégié pour plusieurs applications telles que la compression, la segmentation, débruitage, tatouage ...etc. Grâce à sa caractéristique spécifique (localisation espace - fréquence), les ondelettes sont considérées comme l'un des outils les plus dominants et couvrant une variété immense d'application d'engineering [11].

#### 3. 1. Caractérisation de la décomposition ondelettes

Les ondelettes sont issues de ce qu'on appelle onde mère .On aboutira à représenter n'importe quel signal  $L^2$ , par une base d'ondelettes qui ne sont que des versions dilatées et translatées de l'onde mère. La représentation d'un signal continu  $x(t)$  par une base d'ondelettes est donnée par:

$$X(t) = \sum w(a, b). \varphi_{a,b} (t) \quad (2.2)$$

où  $W(a,b)$  est la pondération (le poids) de la contribution de l'ondelette  $\psi_{a,b}$  liée à l'onde mère par :

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{a} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.3)$$

$a$  : facteur d'échelle et  $b$  : facteur de translation. La pondération de chaque ondelette est décrite par :

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t). \Psi_{a,b}(t). dt \quad (2.4)$$

### 3. 2. Condition d'admissibilité

Les fonctions d'ondelettes doivent être appartenir à  $L^2$ . C'est à dire carré intégrable et vérifier la condition d'admissibilité :

$$\Psi(\omega) |_{\omega=0} = 0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) e^{-j\omega t} dt |_{\omega=0} = 0 \quad (2.5)$$

Cette condition est nécessaire pour assurer d'avoir le signal d'origine  $x(t)$  à partir de la transformée inverse d'ondelettes [12].

La formule d'inversion de cette transformée est donnée par la relation suivante :

$$x(t) = \frac{1}{K_{\psi}} \int_R \int_R TOC_x(a,b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da db}{a^2} \quad (2.6)$$

### 3. 3. Illustration du changement d'échelle et de la translation

Le changement d'échelle sert à compresser ou dilater l'onde mère, ce qui mène à analyser les hautes fréquences ou les basses respectivement contenues dans un signal.

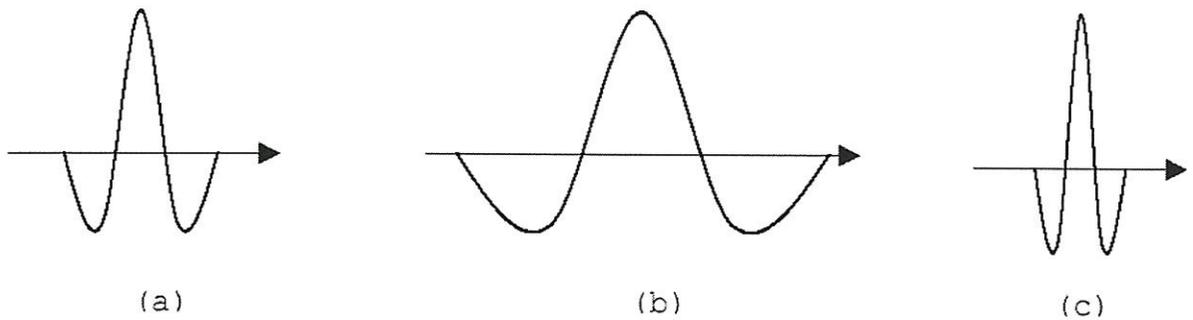


Figure 2.1 : Illustration de la variation du facteur d'échelle. (a) L'onde mère ; (b) L'ondelette pour  $0 < a < 1$  ; (c) L'ondelette pour  $a > 1$ .

Le facteur d'échelle est lié à la fenêtre analysante de l'ondelette. Une longue fenêtre veut dire une vue globale tandis qu'une courte veut dire une vue de détails. La translation est l'opération de glissement de l'ondelette tout au long du signal.

### 3. 4. L'algorithme de la transformée d'ondelettes continue CWT

L'implémentation de la transformée d'ondelettes continue peut se résumer en plusieurs étapes:

**Etape 1** : Prendre l'ondelette et la comparer au segment du signal en cours. (ceci en débutant par le premier segment du signal).

**Etape 2** : Calculer le coefficient  $w(a, b)$ .

**Etape 3** : Translater l'ondelette ; répéter étape 1 à étape 2 jusqu'à balayer tout le signal.

**Etape 4** : Dilater ou compresser l'ondelette et répéter étape 3.

**Etape 5** : Répéter étape 4 pour toutes les échelles choisies.

### 3. 5. La Transformée en Ondelettes Discrète (TOD)

La Transformée en Ondelettes Discrète (TOD) est donc obtenue par échantillonnage des coefficients d'échelle et de temps :

$$TOD_x(j, k) = TOC_x(a = 2^j, b = k2^j), (j, k) \in Z^2 \quad (2.7)$$

Cette transformée peut être inversée par :

$$x(t) = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} TOD_x(j, k) \psi_{j, k}(t) \quad (2.8)$$

Où

$$\psi_{j, k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k), (j, k) \in Z^2 \quad (2.9)$$

### 3.6. L'Analyse Multi-Résolution (AMR)

L'obtention des bases discrètes d'ondelettes repose sur la théorie de l'analyse multirésolution. Cette théorie prévoit que l'on peut analyser un signal en le décomposant en un signal d'approximation et signal de détail. On scinde ensuite l'approximation en une nouvelle approximation plus grossière, et un autre détail. Puis on itère cette procédure représentée sur la figure ci-dessous. L'analyse successive des approximations. Ces approximations sont des versions lissées, donc les parties basses fréquences du signal, dans lesquelles les ruptures sont progressivement gommées ou atténuées. Les détails, au contraire, ressemblent au squelette du signal, ne comportant que les informations de ruptures ou discontinuités [11].

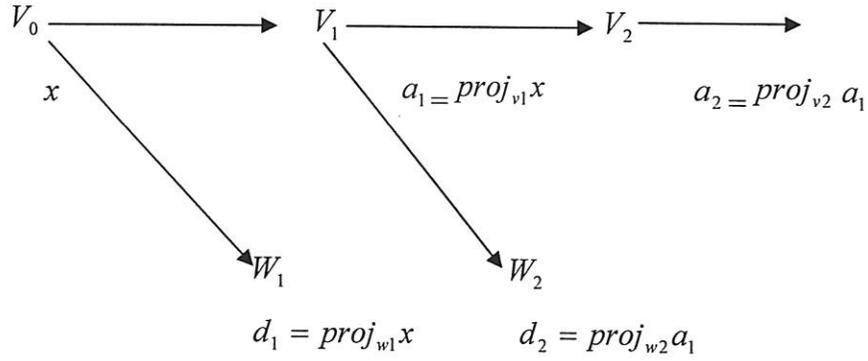


Figure 2.2 : Schéma de décomposition en espace d'approximation et de détail.

L'AMR d'un signal revient donc à le décomposer à différentes échelles, en approximations et en détails. Les espaces de projections du signal sont entièrement caractérisés par les données de deux filtres ( $h$  : passe haut, et  $g$  : passe bas). Ces filtres permettent le calcul rapide des coefficients de la transformée en ondelettes discrète via un algorithme pyramidal itératif présenté en détail ci-dessous.

Pour un signal  $x(t)$  à énergie finie, Les coefficients d'approximations et de détails sont définis par :

$$a_x(j, k) = \int_R x(t) 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}(t-k)) dt = \int_R x(t) \varphi_{j,k}(t) dt \quad (2.10)$$

$$d_x(j, k) = \int_R x(t) 2^{-j/2} \psi(2^{-j}(t-k)) dt = \int_R x(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (2.11)$$

La fonction  $\varphi$  est appelée *fonction d'échelle* car elle permet de passer d'un espace d'approximation à un autre, c'est à dire d'une échelle à une autre.

Les deux filtres  $h, g$  sont liés à  $\psi$  et  $\varphi$  par les deux relations suivantes :

$$\varphi\left(\frac{t}{2}\right) = g \cdot \varphi(t) \quad (2.12)$$

$$\psi\left(\frac{t}{2}\right) = h \cdot \varphi(t) \quad (2.13)$$

L'approximation et le détail du signal  $x(t)$  à la résolution  $2^{-j}$  peut être obtenus par :

$$A_j = \sum_k a_x(j, k) \phi_{j,k}^*(t) \quad (2.14)$$

$$D_j = \sum_k d_x(j, k) \psi_{j,k}^*(t) \quad (2.15)$$

L'approximation du signal à un niveau  $j$  correspond à une approximation plus grossière complétée par le détail :

$$A_j = A_{j+1} + D_{j+1} \quad (2.16)$$

Pour assurer les deux opérations de décomposition et de reconstruction, la condition d'orthogonalité de base pour les deux filtres  $H(\omega)$  et  $G(\omega)$  est nécessaire [9] :

$$|H(\omega)|^2 + |G(\omega)|^2 = 1 \quad (2.17)$$

Algorithme pyramidale de décomposition en ondelettes

Comme on a déjà présenté, l'AMR est basé sur l'inclusion  $v_i$  et  $w_i$  dans  $v_{i-1}$ , nous avons alors [9] :

$$\begin{aligned} a_x(j, k) &= \langle x, \phi_{j,k} \rangle = \int x(\alpha) 2^{-j/2} \phi_0^*(2^{-j} \alpha - k) d\alpha \\ &= \sum_n U(n) \int x(\alpha) 2^{\frac{-(j-1)}{2}} \phi_0^* \left[ \frac{\alpha - 2^{j-1}(2k)}{2^{j-1}} - n \right] d\alpha \\ &= \sum U(n) a_x(j-1, 2k+n) \\ a_x(j, k) &= \sum U(n-2k) a_x(-j-1, n) \end{aligned} \quad (2.18)$$

De la même manière, on trouve :

$$d_x(j, k) = \langle x, \psi_{j,k} \rangle = \sum v(n-2k) a_x(j-i, n) \quad (2.19)$$

Les deux dernières équations peuvent se réécrire sous la forme :

$$a_x(j, k) = \downarrow 2 [U(-k) X a_x(j-1, k)] \quad (2.20)$$

$$d_x(j, k) = \downarrow 2 [V(-k) a_x(j-1, k)] \quad (2.21)$$

Où  $\downarrow 2$  représente l'opération de décimation d'un facteur 2 (sous échantillonnage). On trouve donc que : Les coefficients  $d_x(j, k)$  à l'échelle  $j$  du signal  $x$  peuvent être obtenus à partir de ceux de l'approximation précédente. Les coefficients  $a(j-1, k)$  sont obtenus par des opérateurs de filtrage et décimation plutôt que par calcul direct sur  $x$ . Cette séquence d'opération est schématisée sur la figure 2.3:

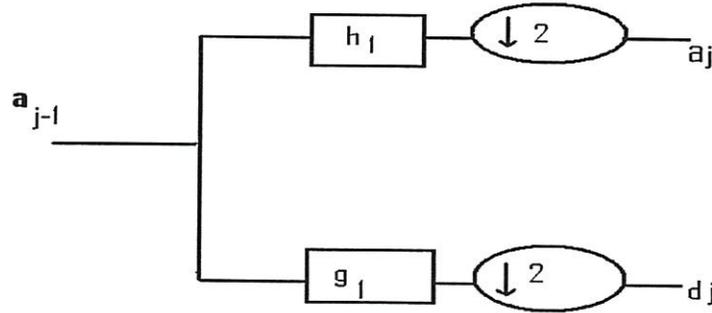


Figure 2.3 : Décomposition en sous bande [11].

Les réponses impulsionnelles  $h_1$  et  $g_1$  sont simplement :  $h_1(n) = U(-n)$  et  $g_1(n) = v(-n)$ . De la même manière, la reconstruction est basée sur la multi résolution. En partant d'un détail et d'une approximation à un niveau de résolution, on produit l'approximation du niveau précédent :

$$\begin{aligned} X_j(t) &= \text{proj}_{v_1} x(t) = \sum_k a_x(j, k) \phi_{j,k}(t) \\ &= \text{proj}^{j+1} x(t) + \text{proj}^{j+1} x(y) \end{aligned}$$

En effectuant le produit scalaire de cette dernière relation avec  $\Phi_{j-1,k}(t)$  on obtient :

$$a_x(j-1, k) = \sum_n a_x(j, n) h_2(k-2n) + \sum_n d_x(j, n) g_2(k-2n)$$

$$\text{OÙ : } h_2 = \langle \hat{\phi}_{1,0}, \phi_{0,k} \rangle = \hat{U}(k) \quad \text{et} \quad g_2(k) = \langle \hat{\psi}_{1,0}, \phi_{0,k} \rangle = \hat{V}(k).$$

$$\text{Il est résulte : } a_x(j-1, k) = \uparrow 2 [a_x(j, k) * h_2(k) + \uparrow 2 [d_x(j, k) * g_2(k)] \quad (2.22)$$

$\uparrow 2$  Représente l'opération d'interpolation (échantillonnage) d'un facteur 2

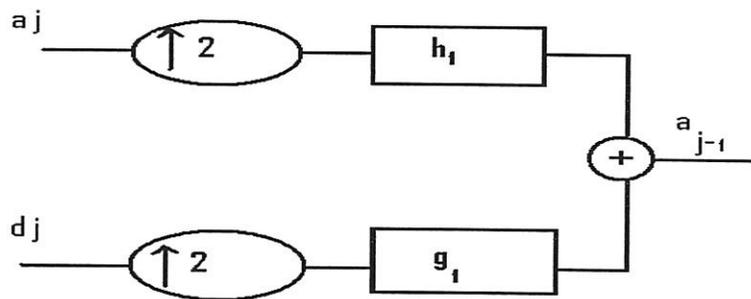


Figure 2.4 : Reconstruction sous bande [11].

Une approximation, à une donnée du signal peut être efficacement obtenue en ajoutant, par l'intermédiaire d'opération sur échantillonnage et de filtrage, l'approximation et le détail du niveau de résolution inférieure.

Le schéma général analyse - synthèse de transformée en ondelettes est représenté sur le figure suivante :

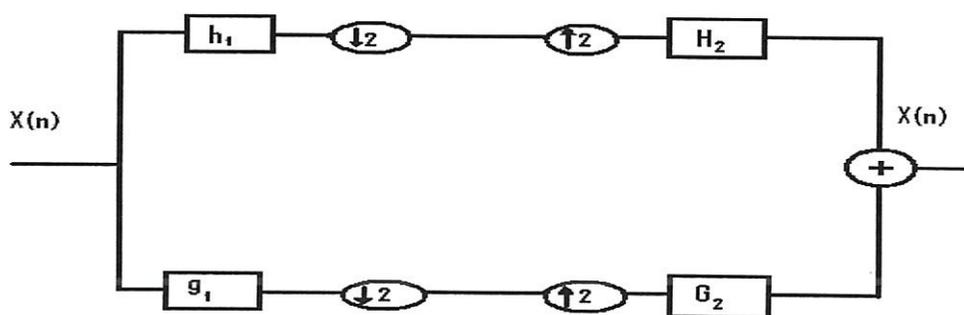


Figure 2.5: Schéma de décomposition reconstruction en sous bande.

Cet algorithme est caractérisé par un coût de calcul extrêmement faible.

### 3.7. Généralisation aux images

La généralisation de l'AMR aux signaux bidimensionnels ne pose aucune difficulté d'ordre théorique si l'on utilise des ondelettes séparables pour chaque dimension  $m$  et  $n$ . En pratique, pour calculer les coefficients d'approximations et de détails d'une image  $I$ , nous utilisons la généralisation de l'algorithme présenté au paragraphe précédent. Chaque étape de cet algorithme est appliquée successivement aux lignes puis aux colonnes de l'image .

### 3.7.1. Schéma de décomposition pour les images

Ils résultent quatre sous bandes obtenues de l'application séparable de deux filtres  $h_1$  (passe bas) et  $g_1$  (passe haut). Les sous bandes notées  $LH_1, HL_1$ , et  $HH_1$  représentent les coefficients d'ondelettes de l'échelle la plus fine plus la sous bande  $LL_1$ .

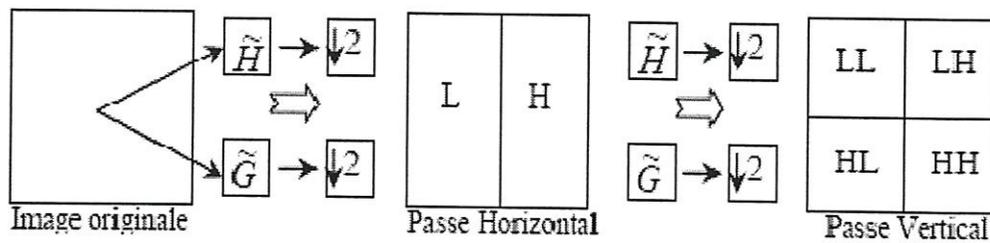


Figure 2.6 : Décomposition de l'image en quatre sous bandes par l'algorithme pyramidal.

Pour obtenir l'échelle grossière suivante des coefficients d'ondelettes, la sous bande  $LL_1$  est encore décomposée et sous échantillonnée. Ce processus continue jusqu'à ce que l'on aboutisse à une certaine échelle [11].

La figure 2.7 montre la décomposition pyramidale résultante de l'image Lena. On obtient pour un niveau de décomposition  $j$  une imagerie d'approximations  $I_j^{LL}(m,n)$ : (filtrage passe-bas lignes et colonnes) et trois imageries de détails,  $I_j^{HL}(m,n)$  (filtrage passe-haut lignes et passe-bas colonnes),  $I_j^{LH}(m,n)$  (filtrage passe-bas lignes et passe-haut colonnes) et  $I_j^{HH}(m,n)$  (filtrage passe-haut lignes et colonnes) selon l'orientation fréquentielle horizontale, verticale et diagonale.

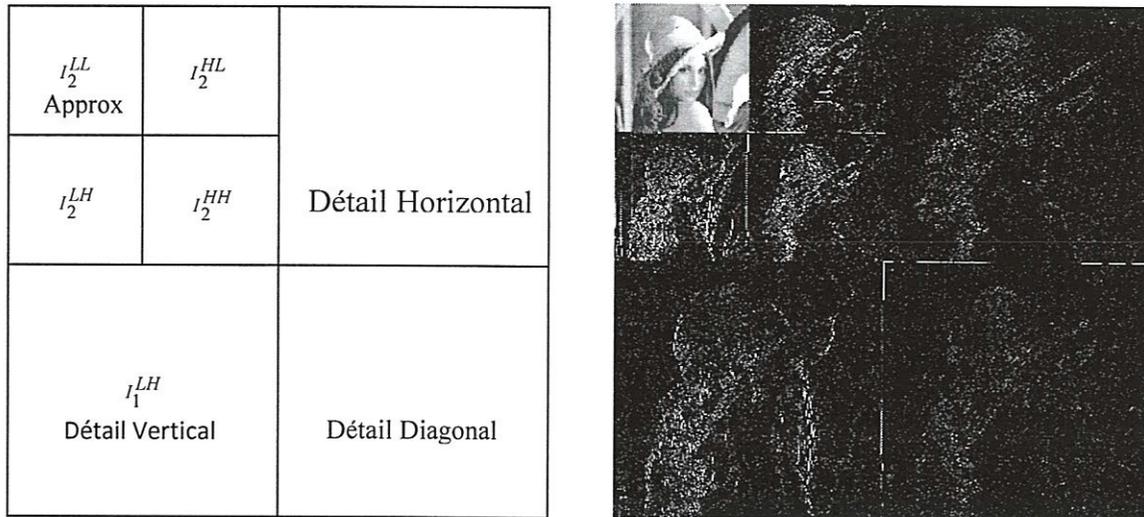


Figure 2.7 : La décomposition pyramidale en deux niveaux de l'image Lena.

#### IV. Décomposition Modale Empirique

La décomposition modale empirique apporte deux nouveautés :

- Elle consiste en une décomposition dans une base non fixe du signal ; en ce sens, elle est auto-adaptative.
- Elle est fondamentalement algorithmique, contrairement à l'analyse en composantes principales qui nécessite de calculer de coûteuses matrices de covariance.

Notons que l'approche EMD contraste avec celle de la théorie de Fourier, ce qui est résumé dans le tableau suivant :

Fourier	EMD
$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{ikt}$	$x(t) = \sum_{k=1}^k d_k(t) + r(t)$
-Grand nombre de composantes. -Fonctions d'une base ( $e^{ikt}$ ). -Signaux stationnaires.	-Nombre restreint de composantes. -Fonctions adaptées. -Signaux non-stationnaires.

Tableau 2.1 : Comparaison entre l'EMD et la transformée Fourier.

#### 4. 1. Principe de l'EMD

La décomposition modale empirique ou EMD est une méthode d'analyse de signal mise au point en 1998, par N.E. HUANG (Hua 1998) ingénieur à la NASA, pour l'étude de données océanographiques. Par la suite, elle a été introduite dans d'autres domaines d'applications.

En effet, l'EMD est une méthode algorithmique de décomposition spectrale adaptative : au lieu d'analyser le signal dans une base fixe comme avec Fourier, on construit au fur et à mesure les fonctions de base. Alors tout signal  $s(t)$  peut-être considéré comme superposition d'une composante lente  $a(t)$  (basses fréquences) appelée approximation et une composante rapide  $d(t)$  (hautes fréquences) appelée détail, toutes deux extraites du signal sans fonction analysante.

Ces composantes sont des IMF (Intrinsèques Modales Fonctions) et sont interprétées comme étant des ondes non stationnaires (c.à.d. modulées en amplitude et en fréquence). On peut écrire :

$$x(t) = a(t) + d(t) \quad (2.23)$$

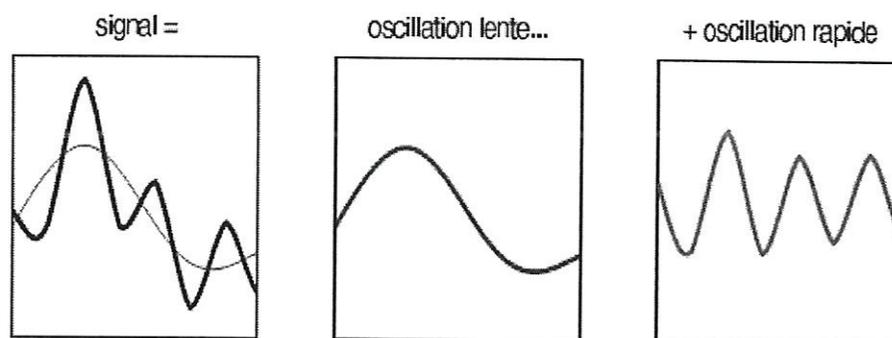


Figure 2.8 : Principe de l'EMD [12].

Donc il suffit de considérer le signal à l'échelle de ses oscillations locales, de soustraire l'oscillation la plus rapide du signal et de réitérer le processus sur le résidu de manière à écrire le signal  $x(t)$  comme une combinaison finie d'oscillations. Le signal  $x(t)$  peut alors s'écrire :

$$X(t) = \sum_{j=1}^N IMF_j(t) + r(t) \quad (N \in N^*) \quad (2.24)$$

Où  $IMF_j(t)$  est la  $j^{\text{e}}$  oscillation,  $r(t)$  le résidu de la décomposition et  $N$  le nombre d'IMF (ou modes).

La fonction  $r(t)$  est appelé résidu de la décomposition. Elle représente la tendance globale du signal original  $x(t)$ , ( $r(t)$  n'est pas nécessairement une quantité négligeable). Par abus de langage, le résidu pourra parfois être qualifié d'IMF, en tant que composante obtenue par l'algorithme EMD.

L'approche proposée repose entièrement sur les caractéristiques oscillatoires de  $x(t)$ . Cette décomposition est entièrement pilotée par les données du signal et adaptée à celui-ci. C'est pourquoi le nom de fonction modale intrinsèque (IMF) a été retenu, principalement car il associe naturellement l'idée de décrire un signal  $x(t)$  suivant ses différents modes d'oscillations naturelles [14].

La méthode est par construction, une décomposition complète,  $N$  étant fini. En effet, si l'on additionne toutes les IMF ainsi que le résidu alors, on reconstruit linéairement le signal original sans perte ou déformation de l'information initiale.

Même si la notion d'IMF repose plus sur une intuition que sur une définition très rigoureuse, cette fonction doit respecter certains critères comme précisé ci-dessous.

Une IMF (ou mode empirique) est une fonction telle que :

$$IMF: \begin{cases} R \rightarrow R \\ t \rightarrow IMF_j(t) \end{cases}$$

Qui doit être :

- a) De moyenne nulle,
- b) Dont les nombres d'extrema et de passages à zéro diffèrent au plus de un (en d'autres termes, cela signifie qu'entre un minimum et un maximum successif, une IMF passe par zéro).
- c) Qui suit une loi de modulation en amplitude et en fréquence (comportement oscillant) naturellement de type mono-composante.

## 4. 2. Algorithme de l'EMD en mono dimension

Plus précisément, la décomposition qui effectue la dichotomie entre oscillation rapide et oscillation lente est obtenue en itérant un opérateur non linéaire agissant à une échelle de temps variable définie par la distance entre extrema locaux consécutifs. Cet opérateur, dit de tamisage (ou sifting). De manière plus générale, l'extraction des  $IMF_j$  suit le schéma suivant (algorithme ci-dessous) [13] :

- Trouver les extrema locaux (maximum et minimum) du signal (étape 3b) ;
- Estimer les enveloppes supérieures et inférieures par interpolation respective de maxima et minima locaux (étape 3(c)). L'interpolation utilisée dans ce cas est basée sur les splines cubiques;
- Estimer l'enveloppe moyenne locale à partir des enveloppes supérieure et inférieure (étape : 3d).
- Soustraire l'enveloppe moyenne du signal d'entrée (étape: 3e). Cela correspond alors la première itération du tamisage. On calcule le critère d'arrêt (étape : 3f) et on vérifie alors que le signal remplit les critères d'une IMF (étape : 3g). Ici le critère décrit est celui proposé par Huang et al.
- Vérifier si le résidu présente un nombre suffisant d'extrema (supérieure à 2) et réitérer sur le signal résultant le processus d'extraction de l'IMF (étape : 3) ; sinon, le résidu est considéré comme étant le résidu final  $r_j(t)$  de l'équation (2). Idéalement, le processus d'extraction des IMF est terminé lorsque le résidu ne contient plus d'extrema.

**Étape 1 :** Fixer  $\alpha, j \leftarrow 1$  ( $j^{\text{e}}$  IMF)

**Étape 2 :**  $r_{j-1}(t) \leftarrow x(t)$  (résidu)

**Étape 3 :** Extraire la  $j^{\text{e}}$  IMF :

(a)  $h_{j,i-1}(t) \leftarrow r_{j-1}(t), i \leftarrow 1$  (i, itération de la boucle de sifting).

(b) Extraire les maxima et minima locaux de  $h_{j,i-1}(t)$ .

(c) Calculer les enveloppes supérieure et inférieure:  $U_{j,i-1}(t)$  et  $L_{j,i-1}(t)$  par interpolation (splines cubiques par exemple) avec les maxima et minima locaux de  $h_{j,i-1}(t)$  respectivement.

(d) Calculer l'enveloppe moyenne :  $\mu_{j,i-1}(t) \leftarrow (U_{j,i-1}(t) + L_{j,i-1}(t))/2$ .

(e) Mettre à jour :  $h_{j,i}(t) \leftarrow h_{j,i-1}(t) - \mu_{j,i-1}(t), i \leftarrow i + 1$ .

(f) Calculer le critère d'arrêt (par exemple) :

$$SD(i) = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{j,i-1}(t) - h_{j,i}(t)|^2}{(h_{j,i-1}(t))^2} \quad (2.24)$$

Où  $T$  : représente le nombre d'échantillons du signal.

(g) Décider : répéter les étapes (b)-(f) tant que  $SD(i) < \alpha$   
et alors mettre  $IMF_j(t) (\equiv IMF_j(t)) \leftarrow h_{j,i}(t)$  ( $j^e$  IMF).

**Etape 4** : Mettre à jour le résidu :  $r_j(t) \leftarrow r_{j-1}(t) - IMF_j(t)$

**Etape 5** : Répéter l'étape 3 avec  $j \leftarrow j + 1$  jusqu'à ce que le nombre d'extrema dans  $r_j(t)$  soit inférieur à 2.

D'un point de vue pratique :

- L'algorithme est initialisé en prenant pour première forme d'onde le signal  $x(t)$ .
- A chaque étape de décomposition, le tamisage est itéré  $n$  fois jusqu'à ce que le détail extrait puisse être considéré comme de moyenne globale négligeable au sens d'un critère  
fixé par l'utilisateur.
- La décomposition s'achève lorsque la dernière approximation ne présente plus d'oscillation [14].

Enfin, l'organigramme suivant résume le principe de l'EMD :

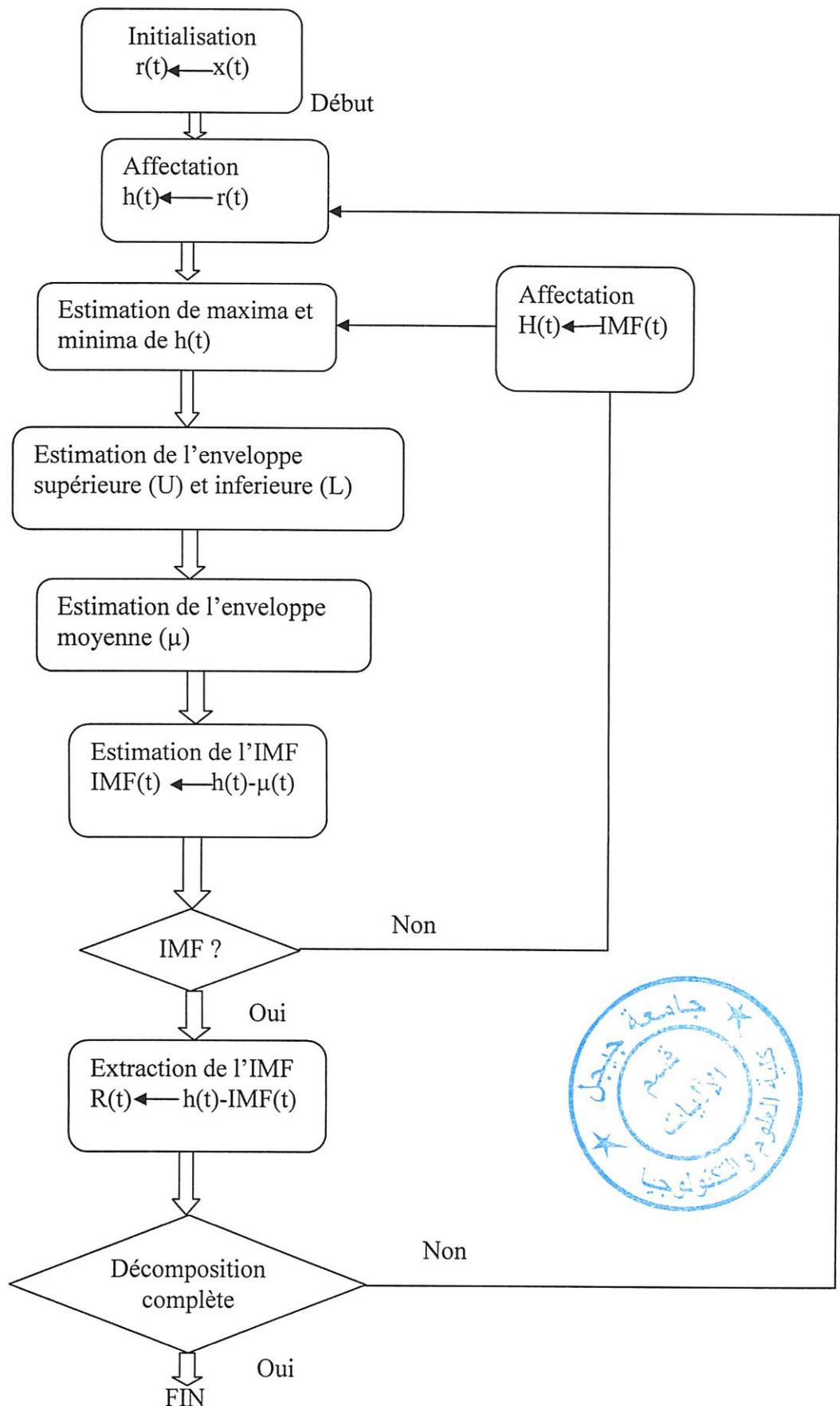


Figure 2.9 : Organigramme du Pseudo-code de l'EMD [14].

### 4. 2. 1. Degrés de liberté dans la méthode

L'algorithme décrit ici nécessite quelques précisions, en particulier le type d'interpolation utilisée pour le calcul des enveloppes et le critère d'arrêt du Sifting Process.

#### 4.2.1.1. Choix d'une méthode d'interpolation

Le type d'interpolation utilisée pour calculer les différentes enveloppes à partir des minima et des maxima est importante, dans la mesure où elle conditionne la forme des IMFs et certaines de leurs propriétés (par exemple, l'utilisation d'une interpolation linéaire par morceaux conduirait à une décomposition en un trop grand nombre de composantes). Dans la littérature, l'interpolation par des splines cubiques est souvent utilisée, grâce au compromis réalisé entre la qualité de l'interpolation et la simplicité du calcul. Par ailleurs, retenons également une interpolation de type pchip (Piecewise Cubic Hermite Interpolation Polynomial), qui préserve la monotonie [15] : si aux nœuds d'interpolation sont associées des valeurs croissantes, la fonction polynomiale par morceaux interpolant sera croissante également ; ceci évite notamment la création d'oscillations matricielles dans les composantes obtenues.

#### 4.2.1.2. Sifting Process

L'algorithme décrit précédemment comporte deux boucles imbriquées l'une dans l'autre ; celle indicée par  $j$  est appelée Sifting Process (SP). Ce SP correspond à un certain nombre d'itérations supplémentaires, effectués sur les détails extraits. L'intérêt du SP est qu'il permet de faire en sorte que les composantes obtenues puissent être considérées comme des IMFs (de manière satisfaisante). La terminaison du SP est liée à un certain critère d'arrêt, qui repose sur l'idée que  $h_j(t)$  soit de moyenne locale nulle ; ceci peut être formulé par l'écart-type [16] ou un paramètre local plus sophistiqué [16]. Nous verrons également en 2D pourquoi il peut être pertinent d'effectuer un nombre fixé d'itérations.

### 4. 3. Problématique de l'EMD en 2D

Nous présentons maintenant des éléments sur l'EMD en 2D. En premier lieu, notons que formellement, l'algorithme EMD vu précédemment s'applique également en 2D, à condition de préciser :

- La notion d'extrema.

- Le calcul des enveloppes (interpolation).
- Le critère d'arrêt lié au Sifting Process (SP).

La BEMD (Bidimensionnel EMD) associée à cet algorithme généralisé conduit à écrire un signal bidimensionnel  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  sous la forme :

$$f(x, y) = \sum_{j=1}^N IMF_j(x, y) + r(x, y) \quad (N \in \mathbb{N}^*) \quad (2.25)$$

Rappelons que la décomposition EMD dépend fortement des degrés de liberté de la méthode, et ceci est plus marqué dans le cadre bidimensionnel. Ainsi les différentes versions formulées conduisent à des résultats assez hétérogènes [15]. Dans un cadre discret, les extremas de  $f$  sont définis comme les points où  $f$  est supérieure à ses 8 voisins (dont au moins un au sens strict). Relevons que la localisation des extrema est a priori quelconque, de sorte que le problème de calcul des enveloppes est un problème d'interpolation de données dispersées (scattered data). On va décrire maintenant des méthodes permettant de calculer efficacement des enveloppes (interpolant des maxima ou des minima). Nous montrerons également qu'il peut être intéressant d'effectuer un nombre restreint d'itérations dans le SP.

### 4. 3. 1. Interpolation basée sur une triangulation

Afin de simplifier le problème d'interpolation, il est possible de le traiter en deux étapes :

1. Triangulation des points  $(X_k, Y_k)$  tel que :  $1 < k < N$ ,
2. Interpolation sur chacun des triangles.

En ce qui concerne la triangulation, un choix usuel est celle de Delaunay, qui permet de décomposer un domaine en un ensemble de triangles. Rappelons que cette triangulation est unique, et que la construction de cette triangulation est réalisable par la construction de son dual, le diagramme de Voronoi (Figure 2.10). D'autres types de triangulations ont été proposés afin de prendre en compte la géométrie de l'image [16]. En ce qui concerne la méthode d'interpolation, les fonctions s'appuyant sur les triangles précédents sont généralement simples. L'interpolation utilisée ici est similaire à un pchip en 1D : la surface obtenue est  $C^2$  à l'intérieur des triangles, les raccords soient  $C^1$  sur chaque arête de la triangulation (Figure 2.10).

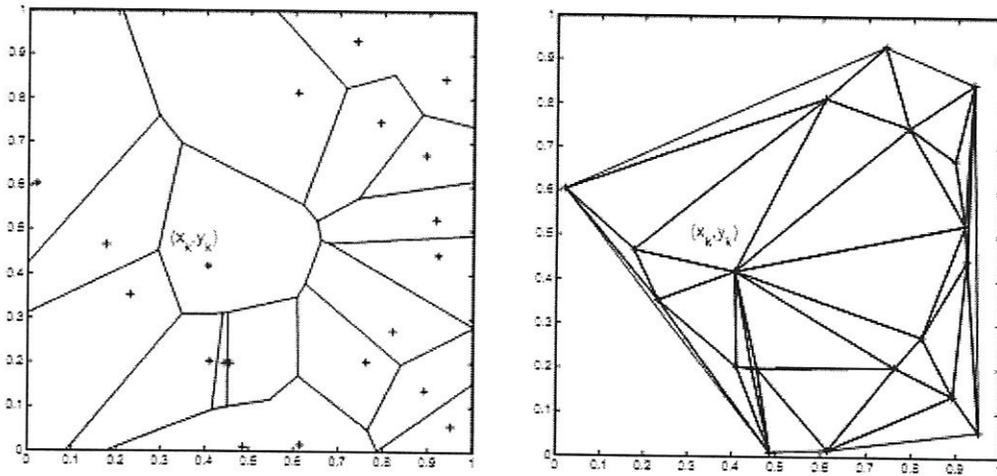


Figure 2.10 : – (A) Diagramme de Voronoi ; (B) Triangulation de Delaunay.

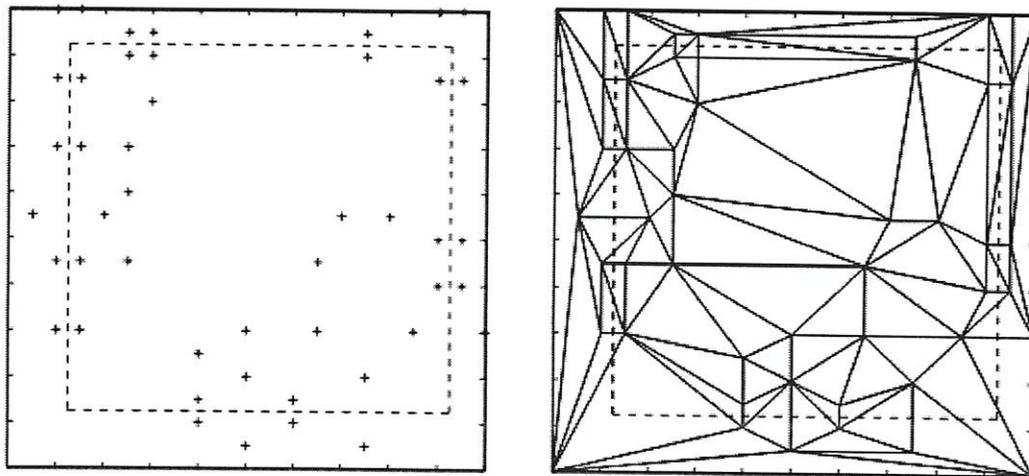


Figure 2.11 : (A) Symétrisations des points à interpoler ; (B) Triangulation de Delaunay correspondante (le tracé en pointillés correspond au domaine initial).

### 4.3.2. Interpolation par voisinage

En deux dimensions il y a plusieurs possibilités pour définir les extrema, chacun donnant une décomposition différente. Dans notre algorithme, et pour des raisons de simplicités, on traite les minima et les maxima de façon entièrement indépendante dans tout l'algorithme et c'est la même méthode utilisée dans la référence [16]. Les points candidats sont extraits par vérification d'un simple prédicat d'externalité locale (4 ou 8 voisins). Donc il nous suffit d'extraire les extrema points en comparant les données avec le point candidat le plus proche de ses quatre ou bien ces huit connectés voisins. Ce processus s'appelle l'interpolation par morceaux-constant.

En effet, dans notre algorithme on décompose notre matrice représentant l'image de test en bloc de  $(4*4)$  et on fait une comparaison entre chaque élément de chaque bloc et ces 3 éléments voisins et on garde la valeur max ainsi que la valeur min de chaque bloc. En procédant comme cité précédemment on obtient les résultats de l'application de la BEMD représentés sur la figure 2. 12 .

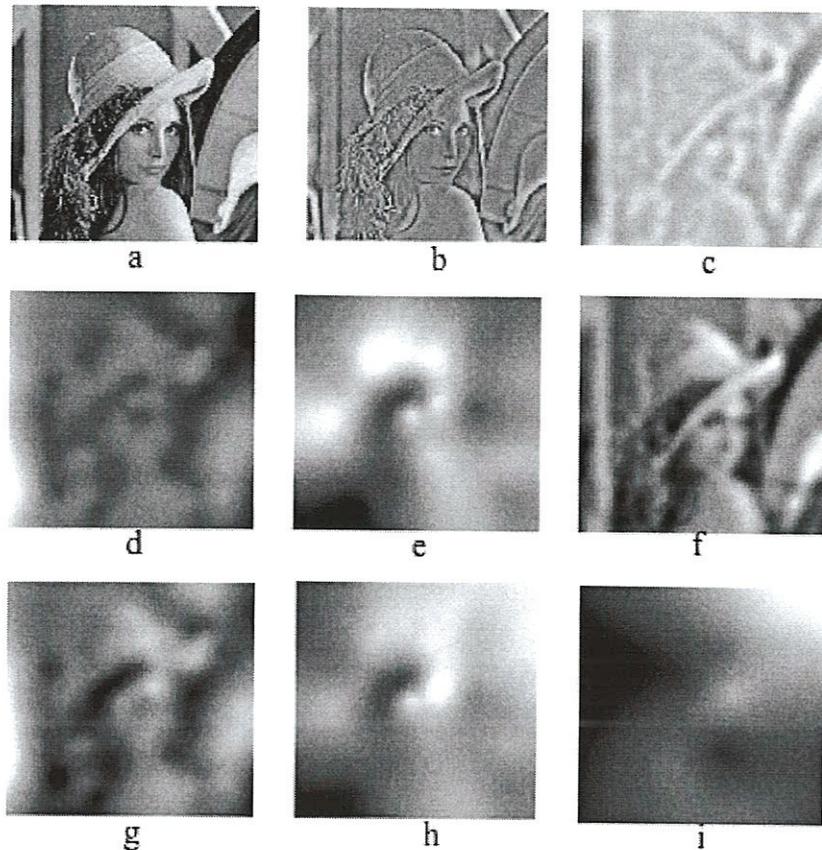


Figure 2.12 : a) image originale, b) premier IMF, c) second IMF, d) troisième IMF, e) quatrième IMF, f) premier résidu, g) second residu, h) troisième Residu, i) quatrième residu.

#### 4.4. Avantages et inconvénients de l'EMD

##### 4.4.1. Avantages

- Simple de mise en œuvre informatique
- Capacité de décrire ponctuellement et de manière instantanée les phénomènes fréquentiels non résolus par l'analyse de Fourier.
- Bien adaptée à l'étude des signaux non-stationnaires [14].

#### 4.4.2. Inconvénients

- Quel rôle joue la méthode d'interpolation dans la construction des enveloppes? En général, l'interpolation spline est utilisée, pourquoi?
- L'analyse mathématique du "sifting processus" (SP) est très parcellaire. En particulier, pourquoi le signal est asymptotiquement d'intégrale nulle? Quelle est la signification physique des modes obtenus?

### V. Décomposition en valeur singulières

Toute matrice  $A$ , de taille  $m \times n$ , de rang  $r$  peut être décomposée en somme pondérée de matrices unitaires  $m \times n$  par SVD. En effet, la décomposition en valeurs singulières repose sur le fait qu'il existe une matrice carrée  $U$  unitaire de taille  $m$  et une matrice  $V$  unitaire de taille  $n$  telles que :

$$U' . A . V = L \quad (2.26)$$

Où  $L$  est une matrice dont les  $r$  premiers termes diagonaux sont positifs, tous les autres étant nuls. (Dans le cas  $m = n$ ,  $L$  est donc diagonale). Les  $r$  termes non nuls sont appelés valeurs singulières de  $A$ . Comme  $U$  et  $V$  sont unitaires, on a les relations  $U.U' = I(m)$  et  $V.V' = Id(n)$ . Ainsi :

$$A = U . L . V' \quad (2.27)$$

Les colonnes de la matrice unitaire  $U$  sont en fait les vecteurs propres de la matrice symétrique  $A.A'$  (les valeurs propres de  $A.A'$  étant les carrés des valeurs singulières de  $A$ ). De même, les colonnes de  $V$  sont les vecteurs propres de la matrice symétrique  $A'.A$  (les valeurs propres de  $A'.A$  sont les mêmes que celles de  $A$ ). Nous utilisons cette décomposition pour calculer les valeurs singulières que nous allons les utiliser pour l'insertion du tatouage. Ces valeurs  $\sigma_i$  seront tirées de la matrice d'image originale.

### VI. Conclusion

Ce chapitre a été consacré pour l'étude de deux techniques de traitement de signal qu'on va les utiliser dans notre schéma de tatouage des images numériques telque ; les ondelettes et la méthode décomposition modale empirique (EMD). On a donné les différentes étapes de ces dernières techniques ainsi que leurs différentes caractéristiques et propriétés. Il est a noté que le chapitre suivant sera la mise en œuvre de ces deux techniques proposées.

# *Chapitre III*

## I. Introduction

Dans le chapitre précédent on a présenté deux différentes méthodes qui seront à la base d'un système de tatouage des images numériques élaboré dans ce mémoire (la décomposition en ondelettes discrète et l'EMD). Dans ce chapitre, on présentera en détail les deux algorithmes élaborés ainsi que les différents tests effectués afin d'étudier la robustesse de chaque approche et faire ressortir les avantages et les inconvénients de chacune d'elles. Nous exposerons d'abord les algorithmes proposés. Ensuite nous donnons les résultats des tests obtenus par les deux méthodes. Enfin nous terminerons par une étude comparative et une conclusion sur les résultats obtenus. On a utilisé le MATLAB 7.9 et nos programmes ont été réalisés sur un PC avec les caractéristiques suivantes : Intel (R) Dual Core-CPU, 2Go de RAM et de vitesse = 2.1 GHz.

L'algorithme proposé appartient à la classe des schémas additifs non aveugles à base d'ondelettes et de l'EMD. La signature ajoutée est une image aléatoire dont on lui applique la SVD pour retirer ses valeurs singulières. Ces dernières seront ajoutées aux valeurs singulières de la deuxième sous-bande (horizontale) de détail du premier niveau de la TOD de l'image pour le premier algorithme. Pour le deuxième c'est le même principe qui sera appliquée mais sur le résidu de l'image originale. Chaque valeur singulière de la marque est multipliée, avant d'être ajoutée, par un facteur de pondération. Pour la détection, on utilise l'image originale (schéma non aveugle comme on a déjà cité) pour pouvoir retirer la marque insérée. Un taux de corrélation est calculé entre la marque insérée et celle extraite de l'image tatouée pour décider si cette dernière est la même que celle insérée ou non.

## II. Plate forme de test

Dans le but d'évaluer les performances de nos schémas de tatouage, nous l'appliquons sur l'image "Lena" de taille 128\*128 donnée par la figure 3.1. Cette image, codée aux niveaux de gris, est classiquement utilisée en traitement d'image. Elle a une distribution fréquentielle moyenne. C'est une image très contrastée, elle comporte des angles vifs et des espaces texturés ainsi que des zones homogènes. Ce choix est judicieux à deux égards :

- ✓ Les images codées sur les niveaux de gris sont la base de travail de la plupart des algorithmes de traitement d'images.

- ✓ En tatouage d'image, la solution de facilité consiste à travailler directement sur la luminance de l'image. Les schémas développés en niveaux de gris peuvent alors s'appliquer sur la luminance des images couleurs [2].



Figure 3.1 : Image Lena 128\*128.

### III. Mesure de qualité

La notion de qualité intervient deux fois dans le cahier des charges d'un processus de tatouage. Il faut d'une part que l'image tatouée soit de la même qualité que l'image originale. D'autre part, les attaques auxquelles doit être robuste le tatouage, doivent conserver la qualité de l'image. Cette notion de qualité permet donc de caractériser les attaques et de restreindre leur ensemble afin d'étudier la robustesse de l'algorithme de tatouage. La mesure de distorsion la plus populaire en traitement d'images, pour quantifier numériquement la qualité d'une image, est tout simplement le PSNR. Il est mesuré en dB à partir de la relation suivante :

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left( \frac{d^2}{EQM} \right) \quad (3.1)$$

Où  $d$  est la dynamique du signal. Dans le cas standard d'une image où les composantes d'un pixel sont codées sur 8 bits,  $d = 255$ .  $EQM$  est l'erreur quadratique moyenne et elle est définie pour 2 images  $I_o$  (image originale) et  $I_r$  (image tatouée) de taille  $m \times n$  comme:

$$EQM = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I_o(i, j) - I_r(i, j)\|^2 \quad (3.2)$$

## IV. Algorithmes et résultats

### IV.1. Algorithme basé sur les ondelettes

Grâce à sa caractéristique spécifique (localisation espace - fréquence), les ondelettes sont considérées comme l'un des outils les plus dominants et couvrant une variété immense d'application d'engineering. C'est pour cela nous pensons qu'il serait très intéressant de voir leur contribution dans le domaine de tatouage des images numériques.

En effet, la transformée en ondelettes d'une image est obtenue en utilisant l'analyse multi résolution. Cette théorie prévoit que l'on peut analyser un signal en le décomposant en un signal d'approximation et signal de détail. On scinde ensuite l'approximation en une nouvelle approximation plus grossière, et un autre détail. Puis en itère cette procédure c'est l'analyse successive des approximations. Ces approximations sont des versions lissées, donc les parties basses fréquences du signal, dans les quelles les ruptures sont progressivement gommées ou atténuées. Les détails, au contraire, ressemblent au squelette du signal, ne comportant que les informations de ruptures ou discontinuités.

L'algorithme proposé, utilise la transformée en ondelette combinée avec la SVD. Il se décompose en deux étapes, l'étape d'insertion, où notre algorithme doit conserver les caractéristiques essentielles du tatouage, qui sont l'imperceptibilité et la robustesse. La deuxième étape c'est la détection, cette étape nous permet de tester l'efficacité de l'algorithme (extraction de la marque). On présente maintenant en détails le schéma élaboré :

#### a. L'insertion

1. Calculer la DWT (Haar) de l'image originale (A) en premier niveau de décomposition (obtention des 4 sous bandes LL, HL, LH, et HH).
2. Appliquer la SVD pour la sous bande horizontale (HL), on obtient la formule suivante :  $A = U_a * S_a * V_a^T$ , et  $\sigma_i, i=1, \dots, n$  sont les valeurs singulières de  $S_a$ .
3. Calculer la DWT de l'image de la marque (W) en premier niveau de décomposition (obtention les 4 sous bandes LL, HL, LH, et HH).
4. Appliquer la SVD pour la sous bande horizontale (HL) de l'image de la marque, on obtient la formule suivante :  $W = U_w * S_w * V_w^T$ , et  $\sigma_{wi}, i=1, \dots, n$  sont les valeurs singulières de  $S_w$ .

5. Modifier les valeurs singulières de la sous bande (HL) de l'image originale en ajoutant les valeurs singulières de la sous bande (HL) de la marque multipliées par une pondération ( $\alpha$ ) suivant l'équation suivante :

$$\sigma^* = \sigma_i + \alpha * \sigma_{wi} \quad (3.3)$$

6. Reconstruire la sous bande de détail horizontale avec les nouvelles valeurs singulières tatouées en utilisant la formule:  $A_w = U_a * \sigma^* * V_w^T$ .
7. Appliquer la DWT inverse pour obtenir l'image tatouée.

L'organigramme correspondant à la phase d'insertion est le suivant :

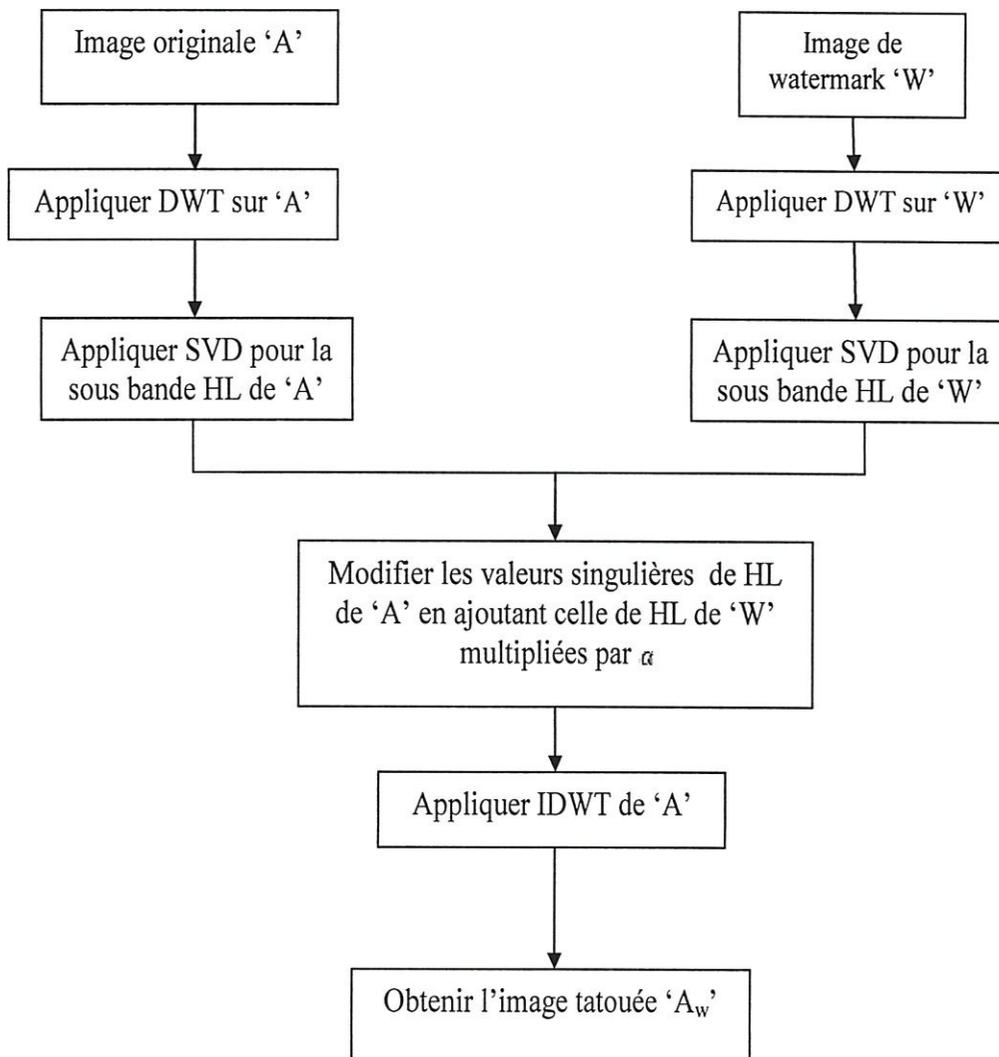


Figure 3.2 : Organigramme d'insertion.

## b. La détection

C'est l'opération inverse de l'insertion où on essaye de retrouver les informations cachées dans l'image. Pour ce faire, on a procédé par corrélation (équation 3.4) entre la marque tirée des coefficients tatoués (les valeurs singulières tatouées) et la marque insérée en binaire. Les différentes étapes de la détection sont les suivantes :

1. Calculer de la DWT (Haar) de l'image tatouée ( $A_t$ ) en premier niveau de décomposition (obtention les 4 sous bandes LL, HL, LH, et HH).
2. Appliquer la SVD pour la sous bande horizontal (HL). On obtient la formule suivante :  $A_t = U_{t_a} * S_{t_a} * V_{t_a}^T$ , et  $\sigma_i, i=1, \dots, n$  sont les valeurs singulières de  $S_{t_a}$ .
3. Calculer les valeurs singulières de la sous bande (HL) de la marque extraite en appliquant l'équation suivante :

$$\sigma_{ext} = (\sigma_{t_i} - \sigma_i) / \alpha \quad (3.4)$$

4. Reconstruire la sous bande de détail horizontal avec les valeurs singulières extraites en utilisant la formule:  $W_{ext} = U_w * S_{ext} * V_w^T$
5. Appliquer la DWT inverse pour obtenir l'image de la marque tirée.

L'organigramme correspondant à la phase de détection est le suivant :

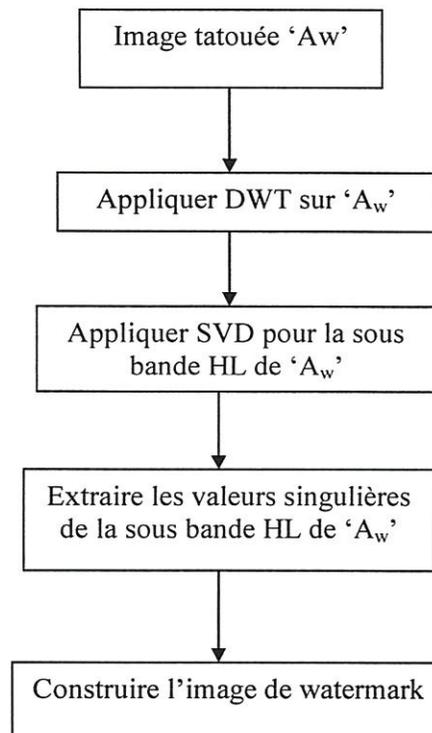


Figure 3.3 : Organigramme de la détection..

Après l'application de différentes étapes de détection, on calcule le taux de corrélation comme suit :

$$corr(W, W') = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i - W_{moy})(W'_i - W'_{moy})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (W_i - W_{moy})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (W'_i - W'_{moy})^2}} \quad (3.5)$$

D'où  $(W_i)$  et  $(W'_i)$  sont les composantes respectives de la marque  $(W)$  et de la marque extraite  $(W')$ . Si la marque tirée est la même que la marque insérée le taux de corrélation sera égal à 1, résultats qu'on a obtenu d'après l'application de notre programme.



Figure 3. 4 : A gauche l'image originale, à droite l'image tatouée.

#### 4. 1. 1. Etude du paramètre $\alpha$

L'insertion de la marque dans une image sera effectuée pour tatouer cette dernière, d'une façon générale la forme de l'image tatouée est donnée par :

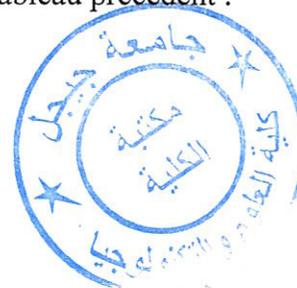
$$image\ tatouée = image\ originale + \alpha * la\ marque.$$

La marque insérée est une image aléatoire représentée sur la figure 3.6, et  $\alpha$  est le facteur de pondération. Ce facteur joue un grand rôle sur l'imperceptibilité de l'image ainsi que pour sa robustesse. C'est pour cela, on variera sa valeur et on notera la valeur du PSNR correspondant, et les résultats obtenus sont présentés sur le tableau 3.1 :

$\alpha$	1000	100	50	20	10	3	0.1	0.01
PSNR	9.7821	21.61	26.90	33.45	38.55	48.27	Inf	Inf

Tableau 3.1 : Variation de PSNR suivant la variation de  $\alpha$ .

La figure 3. 5 représente la courbe correspondante au tableau précédent :



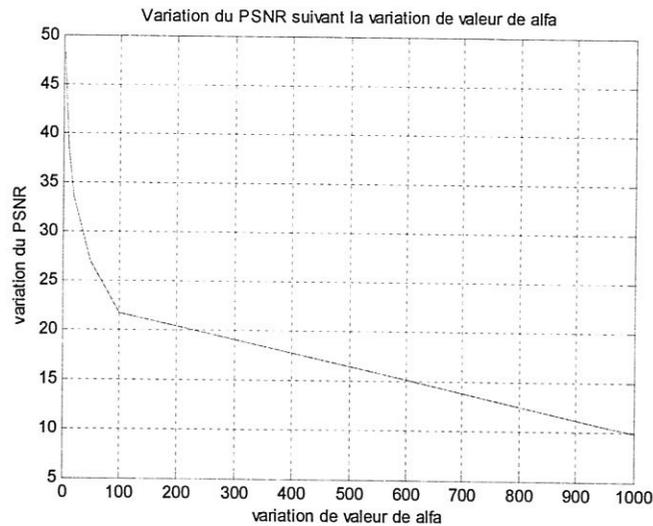
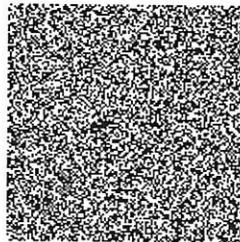
Figure 3.5 : Variation de PSNR suivant la variation de  $\alpha$ .

Figure 3.6 : Marque insérée.

#### ▪ Discussion des résultats

En comparant l'image originale et l'image tatouée, on remarque que le tatouage commence à être visible à partir de la valeur  $\alpha = 20$ . D'après ce résultat, on peut dire que pour  $\alpha \leq 10$  l'imperceptibilité du tatouage est garantie, cette valeur est très intéressante. Pour mesurer l'imperceptibilité du tatouage, on a calculé le PSNR pour différentes images tatouées sachant que la valeur de facteur de pondération  $\alpha$  est variable, on obtient les résultats indiqués dans le tableau précédant (3.1). On remarque que les meilleurs résultats du PSNR sont pour  $\alpha = 0.1$  qui permet de garantir l'imperceptibilité de tatouage. On observe aussi quand la valeur  $\alpha$  augmente, la valeur du PSNR devient de plus en plus faible et le tatouage devient visible.

#### 4.1.2. Choix du filtre utilisé

Le choix du filtre de décomposition ondelettes est fait après une étude sur la variation du taux de corrélation et la valeur du PSNR en fonction des différents filtres existant dans Matlab pour une valeur fixe du paramètre  $\alpha = 0.1$ ; sur le tableau 3. 2 on reporte les résultats obtenus.

Filtre	PSNR	Corrélation
« Haar »	inf	1
« db2 »	inf	0.987
« db45 »	inf	0.994
« sym4 »	inf	0.990
« sym24 »	inf	0.993
« coif3 »	inf	0.990
« bior2.2 »	inf	0.983
« bior3.1 »	inf	0.973
« bior6.8 »	inf	0.991

Tableau 3.2 : Variation de PSNR et Corrélation en fonction des différents filtres d'ondelettes.

#### ▪ Discussion des résultats

On remarque que le PSNR ne change pas pour tous les filtres utilisés. Par contre pour le taux de corrélation on trouve une différence d'un filtre à un autre. En se basant sur ces résultats nous avons choisi le filtre « Haar » car le taux de corrélation est égale à 1 et le PSNR=infini. Chose qui correspond au choix établi par la référence [17].

#### 4.1.3. Choix de la sous bande d'insertion et du niveau de décomposition

La question qui se pose maintenant est : comment on va choisir la sous bande de décomposition pour insérer la marque ? En effet le tatouage doit répondre au compromis robustesse-imperceptibilité. Si on insère dans la sous bande d'approximation, on risque d'altérer la qualité de l'image puisque (c'est les coefficients les plus énergétiques). En insérant dans les coefficients les moins énergétiques on risque de perdre le tatouage suite à une compression par exemple. C'est pour cela nous pensons que l'insertion dans les

moyennes fréquences permet de répondre à ces deux critères en même temps, donc on a choisi la sous bande de détail horizontale pour l'insertion. Ce choix est le même utilisé par les références [17],[18].

Pour le niveau de décomposition on a effectué plusieurs simulations sur les différents niveaux de décomposition, on a retrouvé le même résultat pour le PSNR et le taux de corrélation. Alors nous avons choisi directement le premier niveau pour gagner en temps de calcul.

#### 4.1.4. Robustesse de l'algorithme basé sur les ondelettes

Idéalement, étant donné une image tatouée, une entité non autorisée ne doit pas être capable de détruire la marque, c'est-à-dire que la marque doit résister au traitement de signal commun et des attaques intentionnelles ou non intentionnelles.

La robustesse de la méthode est évaluée par la similarité entre la marque originale  $W$  et la marque extraite  $W'$  en calculant le taux de corrélation. Dans la suite on va effectuer quelques attaques sur l'image tatouée et on va essayer d'extraire la marque insérée ; notons que notre seuil choisi pour le taux de corrélation pour dire que la détection est juste ou non est égale à 0.9.

##### a. Rotation

La première application choisie pour tester la robustesse de l'algorithme est la rotation d'image tatouée ; alors faisant varier l'angle de rotation, on calcule le taux de corrélation pour savoir si la marque tirée est la même insérée ou non. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Angle	25	45	60	90	120
Corr	0.394	0.632	0.699	0.717	0.756

Tableau 3.3 : Variation du taux de corrélation suivant l'angle de rotation pour les ondelettes.



Figure 3.7: Exemples pour la rotation d'image tatouée à droite rotation avec  $60^\circ$  et à gauche rotation avec  $25^\circ$ .

On porte les résultats du tableau 3.3 sur la figure 3.7.

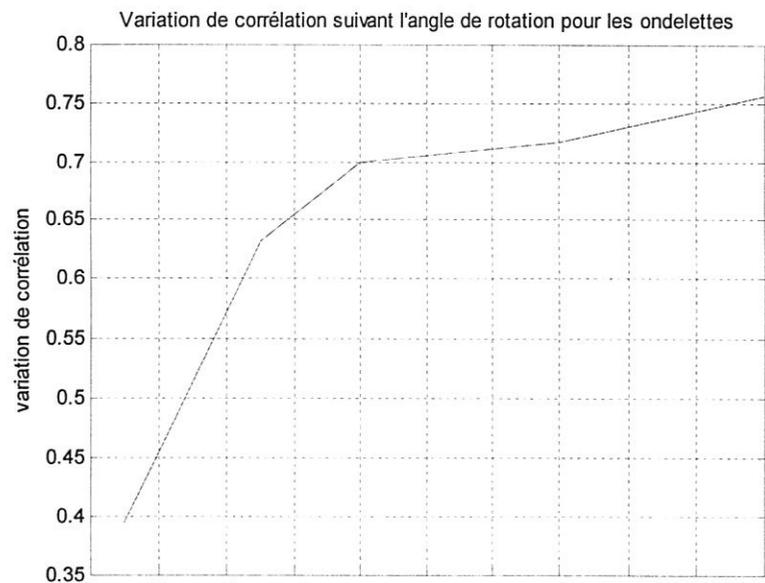


Figure 3.8: Variation du taux de corrélation suivant l'angle de rotation pour les ondelettes.

#### ▪ Discussion des résultats

D'après le graphe obtenu figure 3.8, on remarque que pour les différentes valeurs d'angle de rotation la valeur du taux de corrélation est inférieure au seuil. Donc l'algorithme n'est pas robuste contre l'attaque de rotation.

### b. translation

La seconde application est la translation ; faisant changer le coefficient de translation et on note les différentes valeurs du taux de corrélation :

coeff	-0.0001	-0.001	-0.01	-0.1	0.5	1.5	3
Corr	1	1	1	1	0.324	0.111	0.284

Tableau 3.4: Variation du taux de corrélation suivant le coefficient de translation pour les ondelettes.

#### ▪ Discussion des résultats

Les résultats obtenus d'après le tableau (3.4) nous permettent de conclure que notre algorithme est robuste pour les valeurs négatives du coefficient de translation.

### c. Compression JPEG

Pour cette application, on va changer le facteur de compression sur l'image tatouée et on calcule le taux de corrélation :

Fact	0	10	25	45	60	85	90	100
Corr	-0.735	-0.716	-0.692	-0.591	-0.242	0.722	0.753	1

Tableau 3.5 : Variation du taux de corrélation suivant le facteur de compression pour les ondelettes.

On trace les résultats du tableau 3.5 et on les discute :

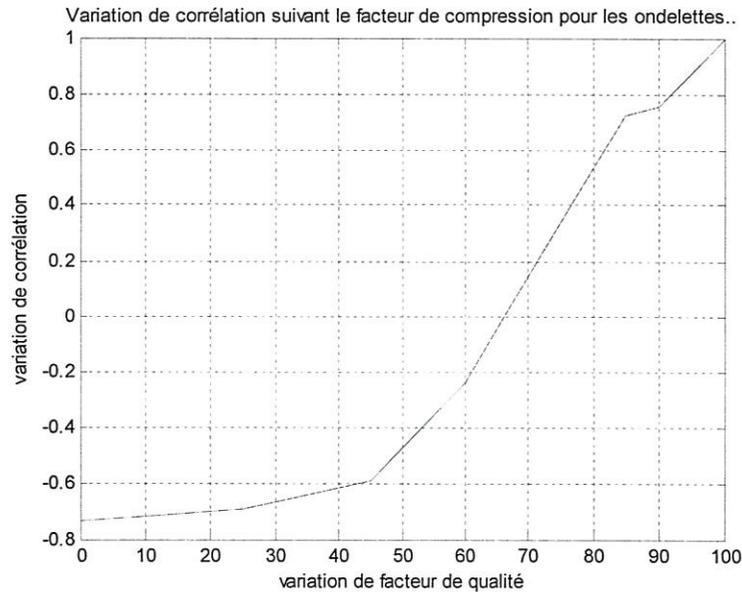


Figure 3.9: Variation du taux de corrélation suivant le facteur de compression pour les ondelettes.

#### ▪ Discussion des résultats

La figure 3.9 montre l'augmentation de facteur de qualité influe sur l'augmentation du taux de corrélation. Cela indique que l'algorithme est robuste jusqu'à une compression correspondante à un facteur de qualité de 95 %. Au-delà de cette valeur le taux de corrélation diminue mais ce taux est encore acceptable pour identifier la marque jusqu'à un facteur de qualité de 85 %.

#### d. Ajout de bruit poivre et sel

La quatrième application choisie afin de tester la robustesse de l'algorithme basé sur la décomposition ondelettes est l'ajout de bruit (poivre et sel) ; on change le facteur du bruit ajouté et on note les variations du taux de corrélation correspondantes : les résultats sont représentée dans le tableau suivant :

Coeff	0.00007	0.0007	0.007	0.07	0.7	1
Corr	1	0.796	0.759	0.755	0.747	0.745

Tableau 3.6 : Variation du taux de corrélation suivant le facteur de bruit pour les ondelettes.

Traçons le graphe correspondant :

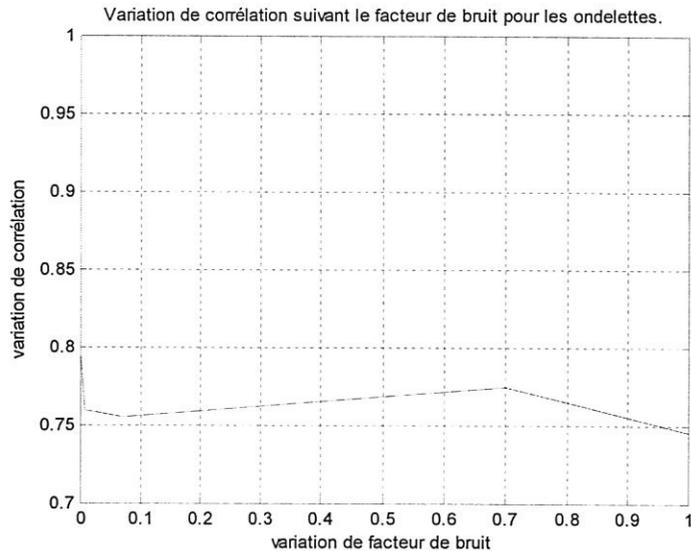


Figure 3.10 Variation du taux de corrélation suivant le facteur du bruit pour les ondelettes.

#### ▪ Discussion des résultats

D'après la figure 3.10 on peut remarquer que l'augmentation du facteur du bruit ajouté influe sur la diminution de la valeur de corrélation. L'algorithme est robuste seulement pour des valeurs de coefficient  $\leq 0.00007$ .

## IV.2. Algorithme basé sur l'EMD

L'EMD est définie par un processus appelé tamisage (sifting) permettant de décomposer le signal en contribution en base appelées modes empiriques ou IMF (Intrinsic mode functions) chacun de moyen nul. La décomposition est locale, itérative et séquentielle. L'EMD considère les signaux à l'échelle de leurs oscillations locales, sans que celles-ci soient nécessairement harmoniques au sens de Fourier. L'extraction des IMF est non-linéaire, mais leur recombinaison pour la reconstruction exacte du signal est linéaire. Dans la suite on va appliquer la décomposition EMD sur l'image Lena (figure 3.5), notons que la valeur d'epsilon choisi égale à 0.2 (voir chapitre II). On obtient des IMFs et un résidu. Premièrement lors de la conception du deuxième algorithme de tatouage proposé dans ce mémoire à base d'EMD, il faut tout d'abord choisir le lieu d'insertion du tatouage. Pour ce faire nous avons fait plusieurs simulations et on a trouvé que le résidu

correspond au meilleur choix (voir paragraphe suivant). La différence entre les deux algorithmes élaborés consiste à utiliser le résidu au lieu de l'image originale par rapport au premier algorithme.

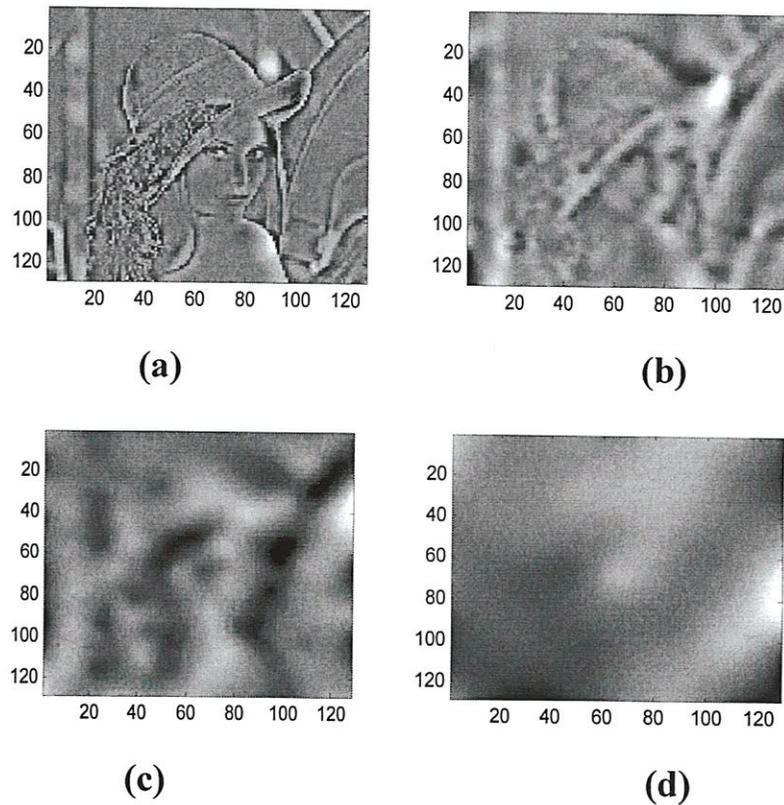


Figure 3.11 :L'EMD pour l'image de Lena : (a) : Première IMF, (b) : Second IMF, (c) :Troisième IMF, (d) : Le résidu.

#### 4. 2. 1. Choix entre IMFs et résidu

Après avoir obtenu les IMFs et le résidu, on applique l'algorithme de tatouage basé sur les ondelettes sur les quatre figures obtenues (3 IMFs et le résidu), on calcule le PSNR et le taux de corrélation, et on reporte les résultats obtenus sur le tableau 3. 7.

	IMF (1)	IMF (2)	IMF (3)	résidu
PSNR	43.89	43.85	43.82	44.02
Corrélation	1	0.999	0.999	1

Tableau 3.7 : Variation de PSNR et du taux de corrélation suivant la variation des IMFs et du résidu.

### ▪ Discussion des résultats

D'après le tableau précédent on remarque que la meilleur valeur du PSNR est lorsque on a insérer la marque dans le résidu donc afin d'obtenir les meilleurs résultats pour le taux de corrélation et le PSNR on va choisir le résidu pour insérer la marque puisqu'il représente la tendance de l'image et il est le moins énergétique par rapport aux IMFs même résultats trouvé dans [19].Après le choix du résidu dont on va insérée la marque on applique les mêmes étapes de la décomposition en ondelettes sur ce dernier, on a obtenu les résultats suivants :



Figure 3.12: A gauche image originale, à droite image tatouée.



Figure 3.13: A gauche résidu originale, à droite résidu tatoué.

## 4.2.2. Robustesse de l'algorithme basée sur l'EMD

### a. Rotation

Faisant varier l'angle de rotation, on calcule le taux de corrélation pour avoir la marque extraite sera la même insérée ou nom avec un même seuil choisi pour l'algorithme basé sur les ondelettes. On a obtenu les résultats représentés dans le tableau suivant :

Angle	25	45	60	90	120
Corr	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999

Tableau 3.8 : Variation du taux de corrélation suivant l'angle de rotation pour l'EMD.

On trace les résultats du tableau 3.8 et on les discute :

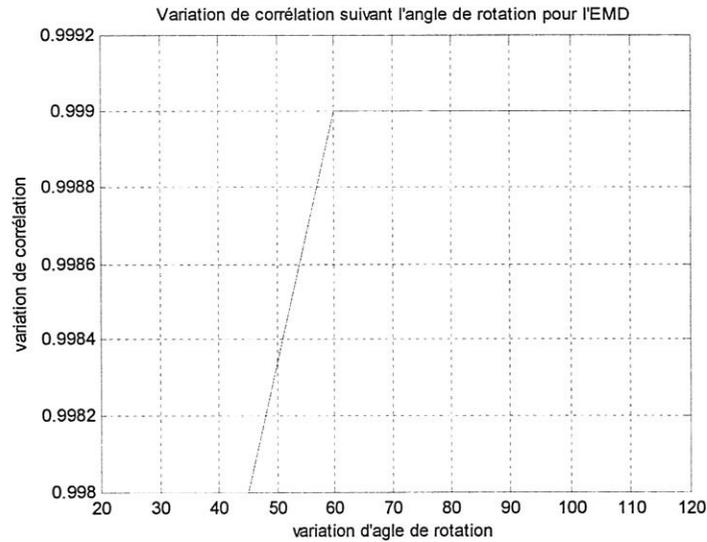


Figure 3.14: Variation du taux de corrélation suivant l'angle de rotation pour l'EMD.

▪ **Discussion des résultats**

D'après les résultats obtenus on remarque que malgré la variation de la valeur d'angle de rotation le taux de corrélation est supérieur toujours à la valeur de seuil 0.9. Donc L'algorithme basé sur l'EMD est robuste quelques soit la valeur d'angle de rotation.

**b. translation**

La seconde application est la translation ; on change le facteur de translation et on note les différentes valeurs de corrélation :

coeff	-0.0001	-0.001	-0.01	-0.1	0.5	1.5	3
Corr	0.999	0.999	0.999	1	1	0.999	0.999

Tableau 3.9 : Variation du taux de corrélation suivant le coefficient de translation pour l'EMD.

### ▪ Discussion des résultats

A partir du tableau 3.9 ; on peut remarquer que la variation du facteur de translation n'influe pas sur le taux de corrélation. L'algorithme est robuste quelque soit le facteur de translation.

### c.Compression JPEG

Pour cette application, on va changer le facteur de compression sur l'image tatouée et on calcule le taux de corrélation :

Fact	0	10	25	45	60	85	90	100
Corr	0.989	0.994	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	1

Tableau 3.10 : Variation du taux de corrélation suivant le facteur de compression pour l'EMD.

On trace le graphe correspondant :

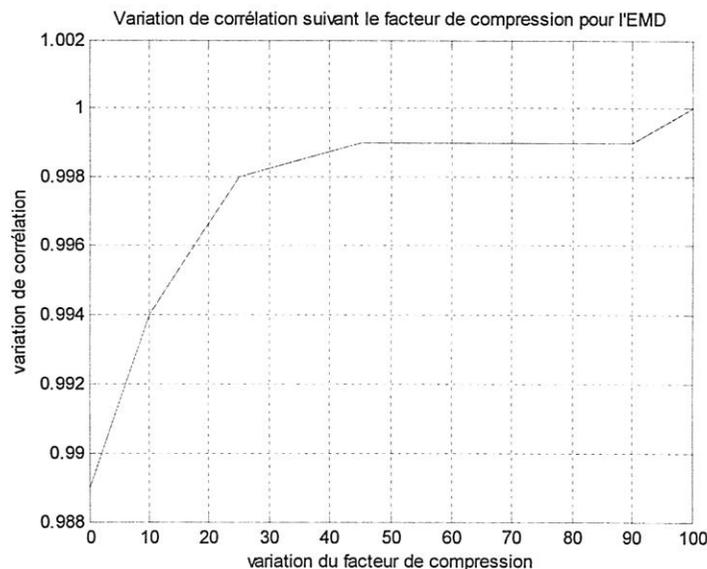


Figure 3.15: Variation de corrélation suivant la variation du facteur de compression pour l'EMD.

### ▪ Discussion des résultats

Le tableau précédent 3.15 montre qu'on peut détecter notre marque insérée quelque soit le facteur de qualité de compression. Donc l'algorithme est robuste contre une attaque de compression JPEG.

### d. Ajout de bruit poivre et sel

La quatrième application choisie afin de tester la robustesse de l'algorithme basé sur l'EMD est l'ajout de bruit (poivre et sel) ; les résultats sont représentée dans le tableau suivant :

Coeff	0.00007	0.0007	0.007	0.07	0.7	1
Corr	0.999	0.999	1	1	1	0.989

Tableau 3.11 : Variation du taux de corrélation suivant le facteur de bruit pour l'EMD.

Traçons le graphe correspondant :

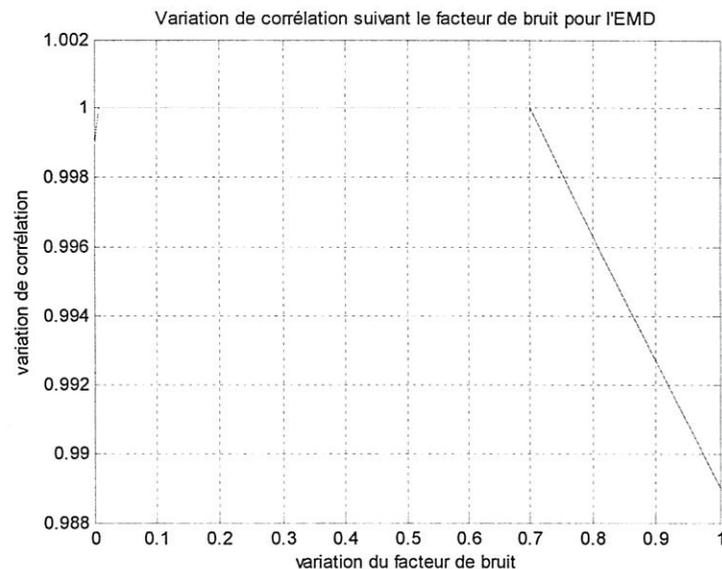


Figure 3.16 : Variation du taux de corrélation suivant le coefficient du bruit pour l'EMD.

#### ▪ Discussion des résultats

Augmentons la valeur du coefficient du bruit ajouté, le taux de corrélation est diminue jusqu'au une valeur égale à 0.007, ce taux devenu stable et égale à 1 si le coefficient appartient à l'intervalle [0.007 0.7] et il diminue lorsque la valeur de coefficient de bruit égal à 1 mais il reste toujours supérieur au seuil .La méthode est robuste quelque soit le facteur du bruit ajouté « poivre et sel ».

## V. Comparaison entre l'algorithme de tatouage basé sur les ondelettes et celui basé sur l'EMD

D'après les résultats obtenus de deux algorithmes étudiés tel que ; le tatouage basé sur les ondelettes et celui basé sur l'EMD ainsi les attaques appliquées sur ces derniers on peut résumer nos résultats dans le tableau suivant :

Attaques	Rotation	Translation	JPEG	Bruit Poivre et sel
Les ondelettes	Pas résistant	$\leq -0.1$	$\geq 95$	$\leq 0.00007$
L'EMD	Résistant	Résistant	Résistant	Résistant

Tableau 3.12 : Tableau comparatif entre le tatouage basé sur les ondelettes et celui basé sur l'EMD.

## VI. Banc de test

Les algorithmes étudiés jusqu'à maintenant sont appliqué sur une seul image de test (Lena.gif), pour assurer la robustesse de nos méthodes on va appliquer ces derniers sur un ensemble des images ainsi que les attaques choisis et on conclure. Le tableau 3.13 représente les différentes valeurs du PSNR et le taux de corrélation sans attaques pour chaque image de test et le tableau 3.14 présente les valeurs des coefficients des attaques acceptables pour chaque image de test :



Figure 3.17: Banc de test.

Les images de test	Ondelettes		EMD	
	PSNR	Corrélation	PSNR	Corrélation
« Lena.gif »	inf	1	48.22	1
« Cameraman.tif »	inf	1	45.82	0.999
« Rice.png »	inf	1	44.14	0.999
« peppers.png »	inf	1	25.32	1
«football.jpg »	inf	1	47.98	0.998
« barbara.png »	inf	1	45.02	0.999
« Mri.tif »	inf	1	38.40	0.999

Tableau 3.13 : Variation du PSNR et du taux de corrélation suivant variation des images de test sans attaques.

Les images de test	Ondelettes				EMD			
	Rotation	Translation	JPEG	Bruit	Rotation	Translation	JPEG	Bruit
« Lena.gif »	Non	$\leq -0.1$	$\geq 95$	$\leq 0.00007$	Résist	Résist	Résist	Résist
« Cameraman.tif »	Non	$\geq -0.1$	$\geq 95$	$\leq 0.00007$	Résist	Résist	Résist	Résist
« Rice.png »	Non	$\leq -0.1$	$\geq 95$	$\leq 0.00007$	Résist	Résist	Résist	Résist
« peppers.png »	Non	$\leq -0.1$	$\geq 95$	$\leq 0.00007$	Résist	Résist	Résist	Résist
«football.jpg »	Non	$\leq -0.1$	$\geq 95$	$\leq 0.00007$	Résist	Résist	Résist	Résist
« barbara.png »	Non	$\leq -0.1$	$\geq 95$	$\leq 0.00007$	Résist	Résist	Résist	Résist
« Mri.tif »	Non	$\leq -0.1$	$\geq 95$	$\leq 0.00007$	Résist	Résist	Résist	Résist

Tableau 3.14 : Les différentes valeurs coefficients des attaques acceptables pour chaque image de test.

▪ **Discussion des résultats**

A partir de deux tableaux précédents on remarque que les résultats de nos deux algorithmes étudiés sont les mêmes trouvées pour l'image choisie au début (Lena.gif) sauf avec quelques petite variation des valeurs de PSNR. Aussi ces résultats trouvés dans [18].

## VII. Conclusion

L'ensemble des tests effectués nous ont permis de conclure que :

- l'insertion du tatouage est faite dans les sous bandes de détail (moyenne fréquences) parce qu'elle a une énergie inférieure par rapport à l'approximation donc moins sensible aux différentes modifications que peut subir sur l'image tatouée. Aussi la valeur du facteur de pondération agit sur l'imperceptibilité du tatouage, donc il faut faire plusieurs tests pour choisir la meilleure valeur.
- La BEMD est une méthode empirique, elle est simplement définie par un algorithme et elle ne possède pas de cadre théorique pour le moment. Dans la plupart des cas, les études (performance, analyse . . .) menées sur la BEMD se font avec des simulations numériques extensives et dans des conditions contrôlées.
- Dans notre étude on a utilisé la BEMD et on a choisi le résidu comme sous bande d'insertion de la marque et d'après les résultats obtenus, on peut constater qu'elle est plus robuste que les ondelettes aux attaques telles que : la compression JPEG, ajout de bruit, translation et rotation malgré qu'elle avait des inconvénients qu'on a déjà indiqués dans le chapitre précédent.

# Conclusion Générale

# Conclusion générale

Le tatouage d'images numériques permet l'insertion d'une information invisible qui doit être préservée lorsque l'image subit divers traitements. L'imperceptibilité d'un schéma de tatouage doit être dans tous les cas maximale contrairement à la robustesse qui est variable selon le type d'application envisagée.

Durant ces dernières années, de nombreuses méthodes ont été proposées, dont plusieurs ont été appliquées, avec succès. Le choix d'une méthode devrait être basé sur les conditions spécifiques de chaque application.

Notre projet s'inscrit dans ce contexte. En effet, nous avons conçu et réalisé un système de tatouage des images numériques basé sur deux techniques différentes : la décomposition en ondelettes et l'EMD. On a étudié la robustesse de ces deux techniques et les résultats de nos tests étaient prometteuses et nous ont permis de constater que :

- les deux méthodes utilisées permettent de garantir l'imperceptibilité du tatouage.
- la méthode basée sur les ondelettes n'est pas robuste contre les attaques choisies tels que : la rotation, la translation, la compression JPEG et l'ajout du bruit « poivre et sel » sauf pour de petites valeurs de coefficients de translation ainsi que le facteur du bruit. Elle avait un avantage par rapport à celle basée sur la BEMD ; elle occupe une taille mémoire très petite et elle est aussi assez rapide que l'EMD.
- vis versa ; la BEMD est très robuste aux attaques choisies, malgré qu'elle souffre d'un grand temps de calcul.

En effet, les techniques élaborées sont de types non aveugles ; on doit posséder de l'image originale pour pouvoir détecter la marque insérée. Ce ci représente un grand inconvénient du fait que ce n'est pas toujours le cas. Alors et en perspective on propose d'améliorer ce système en le rendant aveugle et ceci par l'utilisation de techniques de synchronisation.

Enfin, malgré tous les progrès qui ont été réalisés, les problèmes du tatouage dans des environnements extérieurs restent des challenges qui susciteront les efforts des chercheurs.

# *Bibliographie*

- [1] Bouderbala Ahmed. « Implémentation d'un algorithme de tatouage Vidéo robuste dans Le domaine compressé ». Mémoire de Magister En Electronique. Université Mentouri Constantine. 2005.
- [2] Bouab Mohammed. « Tatouage d'images base sur des propriétés psychovisuelles » Mémoire de Magister En Electronique. Université Mentouri Constantine .2004/2005.
- [3] Vincent Martin. « Contribution des filtres LPTV et des techniques d'interpolation au tatouage numérique ». Thèse de doctorat en Informatique et Télécommunications. Université de Toulouse.2006.
- [4] Gaëtan Le Guelvouit. « Tatouage robuste par étalement de spectre avec prise en compte de l'information adjacente ». Thèse de doctorat en Informatique. Institut national des sciences appliquées de Rennes .2003.
- [5] Patrick Bas. « Méthode de tatouage d'image fondées sur le contenu ».Thèse de doctorat en Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunication, Signal. Université de Grenoble.2000.
- [6] I. R. Farah, Mr I. B. Ismail, et Mr M. B. Ahmed. «A Watermarking system using the wavelet technique for satellite images ».World Academy of science, Engineering and Technology 17 2006.
- [7] Bernd Girod et Frank Hartung et Uwe Horn. « Subband image coding ». Lehrstuhlfur Nachrichtentechnik, Université Germany.
- [8] Hartung et Grod, « Traitement endovasculaire des lésions occlusives ilio caves » Mémoires de l'Académie Nationale de Chirurgie, 2007, 6 (2) : 81-89.
- [9] Julien PUGLIESI - Cedric PIOVANO. « Tatoage d'image ». Université de Nice - Sophia Antipolis .Licence d'Informatique.2004.
- [10] Youngseock Lee ,Jihah Nah et Jongweon Kim. «Digital Image Watermarking Using Bidimensional .Empirical Mode Decomposition in Wavelet Domain » International Symposium on Multimedia. 11th IEEE.2009.
- [11] Benzid Redha. « Ondelettes et Statistiques d'Ordre Supérieur Appliquées aux Signaux Uni et Bidimensionnels ». Thèse de doctorat, Université de Batna.2005.
- [12] Patrick Flandrin. Thèse de doctorat « la Décomposition Modale Empirique des signaux échantillonnés ». Laboratoire de Physique de l'ENS (Lyon).2007.

- [13] Sofiane Hadad. « La décomposition modale empirique pour la détection d'échos ultrasonores multiples ». NDT-Lab, Université de Jijel, Algérie.
- [14] Jean-Christophe Cexus. « Analyse des signaux non-stationnaires par Transformation de Huang, Opérateur de Teager-Kaiser, et Transformation de Huang Teager (THT) ».Thèse de doctorat en Traitement du signal et Télécommunications. Université de Rennes 1.2005.
- [15] Christophe Damerval. « Ondelettes pour la détection de caractéristiques en traitement d'images. Applications à la détection de régions d'intérêt ».Thèse de doctorat en Mathématiques Appliquées. University Joseph Fourier (Grenoble I).2008.
- [16] Anna Linderhed. « Image empirical mode decomposition: a new tool for image processing ».Advances in Adaptive Data Analysis Vol. 1, No. 2 (2009) 265–294. World Scientific Publishing Company.
- [17] T.Sridevi et Y.Ramadevi et Vijaya Kumar. «secure watermarking based on svd and wavelets ».ICGST-GVIP Journal, Volume 10, Issue 5, December 2010.
- [18] Nagaraj Vet Dharwadkar, B et B. Amberker et Avijeet Gorai. « Non-blind Watermarking scheme for color images in RGB space using DWT-SVD» IEEE.2011.
- [19] Ning Bi, Qiyu Sun, Daren Huang, Zhihua Yang, and Jiwu Huang. «Robust Image Watermarking Based on MultibanWavelets and Empirical Mode Decomposition ».IEEE Transactions on image processing, vol. 16, no. 8, august 2007.



# Abstract

Digital technology makes the transmission, storage and editing of multimedia documents much easier than before. But because of this facility, authentication and copyright management becomes difficult thing. The tattoo is a robust solution that has grown significantly over the past ten years. It allows you to insert in a multimedia document (the host document) a message (ID author, digital signature...). This change is perceptible in order not to impede the normal operation of the document marked. Moreover, the extraction algorithm should be able to find the message's eventually despite changes of the host (attacks).

In the setting of this project, we have implemented two algorithms for digital watermarking; one based on the wavelet and the other on the BEMD .

We had done some tests of simulation. According to the gotten results we could conclude that the algorithm based on the BEMD more robust than the other based on the wavelet.

## الملخص

التكنولوجيا الرقمية يجعل نقل وتخزين وتحرير الوثائق المتعددة الوسائط أسهل بكثير من ذي قبل. ولكن بسبب هذا المرفق إدارة حقوق الطبع والنشر والتوثيق أصبحت شيء صعب. الوشم هو الحل القوي الذي نمت بشكل كبير خلال السنوات العشر الماضية. أنها تسمح لك لإدراج في مستند وسائط متعددة (وثيقة المضيف) رسالة (هوية المؤلف ، التوقيع الرقمي،...). هذا التغيير هو ملموس لكي لا تعرقل سير العمل العادي للوثيقة ملحوظ. وعلاوة على ذلك، ينبغي للخوارزمية استخراج تكون قادرة على العثور على الرسالة السرية على الرغم من التغييرات للمضيف (الهجمات).

في مشروعنا هذا قدمنا: خوارزميتين للوشم الواترمارك للصور الرقمية الأولى تركز على المويجات و الثانية هي BEMD. لقد قمنا بالعديد من اختبارات المحاكات ومن خلال النتائج المحصل عليها يمكن ان نستخلص ان الخوارزمية التي تركز على BEMD اكثر فعالية من التي تركز على المويجات.