

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique

Spécialité : Système de Vision et Robotique

présenté par

HANDIS HASSINA

&

OULAHCINE NADIA

Tatouage numérique des images

Proposé par Hocine AIT SAADI & Khaled Loukhaoukha

Année Universitaire 2016-2017

ملخص: مشروع نهاية الدراسة يدرس كيفية الوشم الرقمي للصور و الذي يدمج المعلومة (علامة تجارية) حق

النشر و التأليف

طريقة التحسين تستخدم عوامل العددية متعددة و التي ستساعد على تحسين من وجهة قوة الاداء و شفافية في

اتقنية الخفاء للوشم الرقمي

ان استعمال خوارزميات طريقة تحسين مستعمرة النحل يثبت نجاحها و يحقق نتائج ممتازة من حيث المتانة و

الشفافية في الخفاء

كلمات المفاتيح:

Résumé : Le PFE traite le tatouage numérique des images qui consiste à rajouter une information (une marque) de copyright. La technique est utilisée pour la protection intellectuelle ou l'identification du propriétaire. L'optimisation utilisant des facteurs scalaires multiples va aider à améliorer les performances de point de vue robustesse et imperceptibilité du tatouage numérique. L'utilisation de l'algorithme d'optimisation colonie d'abeilles s'avère fructueuse et permet d'obtenir d'excellents résultats en termes des différentes mesures objectives de la robustesse et imperceptibilité comme le PSNR, NC, SSIM, MSE.

Mots clé : tatouage numérique, optimisation, robustesse, imperceptibilité.

Abstract:The PFE treat the digital water-marking of images which consists of adding a piece of information (a mark) of copyright. The technique is used for intellectual protection or identification of the owner. Optimization using multiple scalar factors improve the performance of digital watermarking in robustness and imperceptibility. The use of Bee colony optimization algorithm turns out efficient and allows to obtaining excellent results in terms of objective measures of robustness and imperceptibility as PSNR, SSIM, NC.

Keywords : Digital water-Marking, multi-objective optimization, robustness, imperceptibility

REMERIECEMENTS



Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH qui nous a donné la force, le courage et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nos remerciements, reconnaissance et gratitude vont tout d'abord à l'administration et à l'ensemble du corps enseignant de l'Université de BLIDA 01 (faculté de technologie/département d'Electronique) pour la richesse et la qualité de leur enseignement et leurs efforts à nous garantir la continuité et l'aboutissement de ce programme de master.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Monsieur AIT SAIDI Hocine, ses précieux conseils, l'orientation, la confiance, son aide durant toute la période du travail et la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nous remercions vivement Monsieur Khaled Loukhaoukha, pour sa précieuse contribution dans ce travail en tant qu'expert en tatouage numérique des images.

Nos vifs remerciements vont également au président de jury et les membres du jury pour l'intérêt dont ils font preuve à notre égard pour lire ce mémoire et examiner notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience (J'adresse un retentissant hommage à mon feu Père Handis Abdelkader, pour qui entre autres, j'ai spécialement porté cette tenue aujourd'hui, et à ma mère Youcef khoudjaZahia, pour avoir pu cimenter ma vie dans un douillet cocon familial, fait d'amour, de bravoure et de zèle au travail).

A nos familles qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.

DEDICACE

A mes chers parents HandisAbd el kader et Youcef KhoudjaZahia

A mes chers frères Saïd, Cherif et Chafik A mes chères sœurs Siham et Mimi

A mes beaux frères Mohamed et Hamid

A ma belle sœur Lila

A mes nièces et mes neveux

A ma famille et à tous mes amis

Sommaire

Remerciments

Table des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
1 CHAPITRE1 Concept de base et Etat de l'art sur le tatouage numérique des images.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Historique du tatouage numérique.....	3
1.3 Le principe du tatouage numérique des images.....	4
1.4 Schéma général de tatouage numérique.....	4
1.4.1 Phase d'insertion.....	5
1.4.2 Phase d'extraction.....	6
1.4.3 Les attaques considérées dans le tatouage.....	6
1.5 Les différentes représentations de l'image.....	7
1.5.1 La représentation spatiale.....	7
1.5.2 La représentation fréquentielle.....	7
1.6 Applications du tatouage numérique d'images.....	11
1.7 Classification des algorithmes du tatouage.....	12
1.7.1 Classification selon la robustesse.....	12
1.7.2 Classification selon perception de la marque.....	12
1.7.3 Classification selon la technique d'insertion.....	13
1.7.4 Classification selon la préservation de l'image originale.....	13
1.7.5 Classification selon le domaine d'insertion.....	14
1.8 Critères d'évaluation.....	15
1.9 Conclusion.....	16
2 CHAPITRE2 Algorithmes de Tatouage numérique Basés sur la décomposition SVD.....	17

2.1	Introduction.....	17
2.2	Décomposition en valeurs singulières SVD.....	18
2.3	Algorithmes de tatouage numérique basés sur la SVD.....	19
2.3.1	Algorithme spatial de tatouage numérique basé sur la SVD.....	19
2.3.2	Algorithme de tatouage numérique basé sur la SVD et la DWT.....	21
2.3.3	Algorithme de tatouage numérique basé sur la SVD et la DFT.....	23
2.3.4	Algorithme de tatouage numérique proposé basé sur la SVD et la LWT.....	24
2.4	Conclusion.....	28
3	CHAPITRE3 Optimisation par l’algorithme de colonie d’abeilles artificielles.....	29
3.1	Introduction.....	29
3.2	Classification des méthodes métaheuristiques.....	30
3.3	Optimisation par l’algorithme colonie d’abeilles artificielles.....	31
3.3.1	Les abeilles en nature.....	31
3.3.2	La recherche de nourriture chez les abeilles.....	33
3.3.3	Exploration des sources de nourriture.....	33
3.3.4	Méthode de communication chez les abeilles.....	34
3.3.5	Optimisation naturelle : les directions fournies par les abeilles.....	36
3.4	Algorithme colonie d’abeilles artificielles.....	36
3.5	Optimisation multi-objective des paramètres d’insertion par l’algorithme ACAA.....	41
3.6	Conclusion.....	43
4	CHAPITRE4 Simulation et Résultats.....	44
4.1	Introduction.....	44
4.2	Imperceptibilité et robustesse avec un facteur d’insertion scalaire $\alpha = 2.4$	44
4.3	Simulations et résultats d’optimisation multi-objective des paramètres d’insertion par l’algorithme de colonie d’abeilles artificielles.....	52
4.3.1	L’optimisation multi-objective par l’attaque d’égalisation d’histogramme.....	53
4.3.2	L’optimisation multi-objective par le filtre gaussien 3×3	54
4.3.3	L’optimisation multi-objective par le bruit sel & poivre de paramètre 0.05.....	54

4.3.4	L'optimisation multi-objective par la quantification des niveaux de gris.....	55
4.3.5	L'optimisation multi-objective pour les trois attaques simultanées.....	56
4.4	Conclusion.....	57

Conclusion générale

Bibliographie

Liste des tableaux

Tableau 4.1	Résultats d'imperceptibilité en utilisant un facteur scalaire unique.	48
Tableau 4.2	Résultats de la robustesse en utilisant un facteur scalaire unique.	52
Tableau 4.3	Résultats des tests d'imperceptibilité et de la robustesse en utilisant un facteur scalaire multiple optimisé par ACAA.	56
Tableau 4.4	Résultats des tests d'imperceptibilité et de la robustesse en utilisant trois attaques en même temps et un facteur scalaire multiple optimisé par ACAA.	57

Liste des figures

Figure 1.1	Contraintes du tatouage d'image.	4
Figure 1.2	Schéma général de tatouage numérique.	5
Figure 1.3	Banc de filtres à deux bandes.	10
Figure 1.4	(a) Décomposition on DWT à un niveau. (b) Décomposition on DWT à un niveau de l'image Lina.	10
Figure 1.5	Classification des algorithmes de tatouage d'image.	13
Figure 2.1	Procédure d'insertion de l'algorithme spatial basé sur la SVD de Aslantas [8].	19
Figure 2.2	Procédure d'extraction de l'algorithme spatial basé sur la SVD de Aslantas [8].	20
Figure 2.3	Procédure d'insertion de l'algorithme de tatouage numérique basé sur la SVD et DWT de [9].	21
Figure 2.4	Procédure d'extraction de l'algorithme de tatouage numérique basé sur la DWT et la SVD de [9].	23
Figure 2.5	Procédure d'insertion de l'algorithme de tatouage basé sur la SVD, DFT [10].	23
Figure 2.6	Procédure d'extraction de l'algorithme de tatouage numérique proposé basé sur la SVD et la DFT [10].	24
Figure 2.7	Procédure d'insertion de l'algorithme de tatouage numérique proposé basé sur la SVD et la LWT [11].	25
Figure 2.8	Procédure d'extraction de l'algorithme de tatouage numérique proposé basé sur la SVD et la LWT [11].	27
Figure 3.1	Exemple d'une fonction objective multimodale à minimiser.	29
Figure 3.2	Classification des méthodes d'optimisation.	31
Figure 3.3	(a) Dance en huit. (b) Dance en rond.	34
Figure 3.4	L'indice de la direction.	35
Figure 3.5	Organigramme du modèle de l'algorithme de ACAA.	40
Figure 4.1	Images originales et image marque.	45

Figure 4.2	Image « Woman » tatouée.	46
Figure 4.3	Image « Boat » tatouée.	46
Figure 4.4	Image « village » tatouée.	47
Figure 4.5	Image « Man » tatouée.	47
Figure 4.6	Image « Baboon » tatouée.	48
Figure 4.7	(a) image «Woman» tatouée attaquée, (b) image marque « lettre B » extraite.	49
Figure 4.8	(a) image «Boat» tatouée attaquée, (b) image marque « lettre B » extraite.	49
Figure 4.9	(a) image « village» tatouée attaquée, (b) image marque « lettre B » extraite.	50
Figure 4.10	(a) image « Man» tatouée attaquée, (b) image marque « lettre B » extraite.	50
Figure 4.11	(a) image « Baboon» tatouée attaquée, (b) image marque « lettre B » extraite.	51
Figure 4.12	(a) image originale, (b) image marque	53
Figure 4.13	(a) image tatouée, (b) image égalisée, (c) image marque extraite.	53
Figure 4.14	(a) image tatouée, (b) image filtrée, (c) image marque extraite.	54
Figure 4.15	(a) image tatouée, (b) image bruitée, (c) image marque extraite.	55
Figure 4.16	(a) image tatouée, (b) image quantifiée, (c) image marque extraite.	55

Introduction générale

Les réseaux numériques de communication sont largement utilisés pour l'acquisition avec une grande facilité des informations numériques comme les images, le texte, audio, vidéo. Le transfert sécurisé, la protection de la propriété intellectuelle des données échangées et la détection des faussaires, est une nécessité primordiale pour sauvegarder tous les droits du copyright et lutter contre la falsification et l'usurpation. Afin d'assurer la confidentialité et d'empêcher toute modification ou exploitation non autorisée des données, le tatouage numérique est largement utilisé dans diverses applications. Citons par exemple, l'internet, la téléphonie mobile, les distributeurs de billets, les abonnements aux chaînes de télévision payantes, le commerce électronique et les cartes à puce. La technique du tatouage numérique consiste à insérer une marque illisible et imperceptible (texte, image, signature, logo ou autre) dans les données qu'on souhaite protéger et fournir la sécurité et l'authenticité aux éventuels transferts sur les divers systèmes de communication.

Plusieurs techniques de tatouage ont été développées et peuvent être classifiées de différentes manières. On distingue généralement deux types de tatouage selon l'apparence ou non de la marque insérée : le tatouage visible et le tatouage invisible. Les systèmes de tatouage invisibles sont largement utilisés, puisque d'une part il est difficile de faire la distinction entre l'information originale (image, audio ou vidéo) et l'information tatouée, et d'autre part, une tentative de suppression de la marque insérée provoque une dégradation de manière significative de la qualité de la donnée tatouée.

Dans ce projet de fin d'études, on s'est intéressé au tatouage numérique des images. Il existe dans la littérature des techniques de tatouage spatiales et fréquentielles. Mais on constate que les algorithmes traditionnels de tatouage dans le domaine spatial comme ceux qui modifient les bits de poids faibles LSB (Least Significant Bit) des pixels de l'image, ne sont pas très robustes aux attaques comme la compression et l'ajout de bruit.

On s'est focalisé dans ce travail sur le tatouage numérique des images basé sur la transformée en ondelettes à base du schéma de *lifting* (LWT) et la décomposition en valeurs singulières (SVD). Habituellement un facteur scalaire unique est utilisé pour contrôler l'intensité de l'insertion de la marque. Cependant, l'utilisation des facteurs d'insertion multiples s'avère plus efficace et permet ainsi de trouver un meilleur compromis entre la robustesse et l'imperceptibilité du tatouage numérique. Le problème devient donc un problème d'optimisation multi-objective pour trouver les meilleures valeurs des facteurs d'insertion. L'algorithme d'optimisation colonie d'abeilles artificielles est ainsi utilisé.

Ce rapport est organisé en quatre chapitres :

- **Le chapitre 1** : décrit le principe général du tatouage numérique des images ainsi que les différentes représentations de l'image, les applications du tatouage numérique d'images et aussi la classification des algorithmes du tatouage.
- **Le chapitre 2** : il consiste à l'étude du principe de la transformée SVD (décomposition en valeurs singulières). Puis nous étudions plusieurs algorithmes de tatouage basés les techniques hybrides, SVD-DWT, la SVD-DFT et la SVD-LWT.
- **Le chapitre 3** : Il est consacré à l'algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles.
- **Le chapitre 4** : Dans ce chapitre nous donnons les résultats de nos simulations sur le logiciel Matlab, avec le tatouage numérique des images basé sur la SVD-LWT et l'optimisation par l'algorithme de colonie d'abeilles. Les performances obtenues sont évaluées en termes de robustesse et d'imperceptibilité.

1 CHAPITRE1 Concepts de base et Etat de l'art sur le tatouage numérique des images

1.1 Introduction

Le tatouage numérique des images est une technique permettant de cacher une quantité d'information dans une image. On appelle cette quantité est appelée « marque » ou bien « message ». Le tatouage numérique est une technique très récente, dont on fait remonter la naissance en 1990.

Dans ce chapitre, on présente l'historique et le principe du tatouage numérique, ainsi que le schéma général du tatouage numérique et ces différentes applications. On obtient à la fin, la classification des algorithmes du tatouage numérique.

1.2 Historique du tatouage numérique

Dès 1990, Tanaka et al [1] introduisent l'idée de « taguer » les images digitales pour cacher secrètement des informations et assurer ainsi les droits de propriété.

Les tatouages se sont rapidement étendus en Italie et puis en Europe et bien qu'au commencement, ils étaient utilisés pour indiquer la marque ou le fabricant de papiers.

Les tatouages du papier sont apparus dans l'art de la fabrication du papier il y a presque 700 ans. Le plus ancien document tatoué trouvé dans les archives remonte à 1992 et a son origine dans la ville de Fabriano en Italie qui a joué un rôle important dans l'évolution de l'industrie papetière.

Le premier article utilisant le terme Digital Watermark semble être celui de Komatsu et Tominaga [2] en 1988.

1.3 Le principe du tatouage numérique des images

Le tatouage numérique des images consiste à insérer une marque invisible ou bien visible dans une image. La technique d'insertion utilise une clé secrète, la marque à insérer doit être imperceptible pour l'utilisateur, robuste aux attaques, donc la marque doit respecter trois contraintes fondamentales représentées par la figure (1.1).

- **L'imperceptibilité** : le tatouage numérique introduit des distorsions très faibles, mais ces distorsions ne peuvent pas affecter la qualité de l'image originale afin que l'image tatouée soit visuellement équivalente à l'image originale.
- **La capacité** : elle représente la quantité d'information insérée dans une image, cette quantité est très variable selon les applications. De façon générale, plus la capacité est faible plus la robustesse et l'imperceptibilité sont fortes.
- **Robustesse** : on parle de robustesse pour définir la résistance du tatouage face à des attaques bienveillantes ou malveillantes.

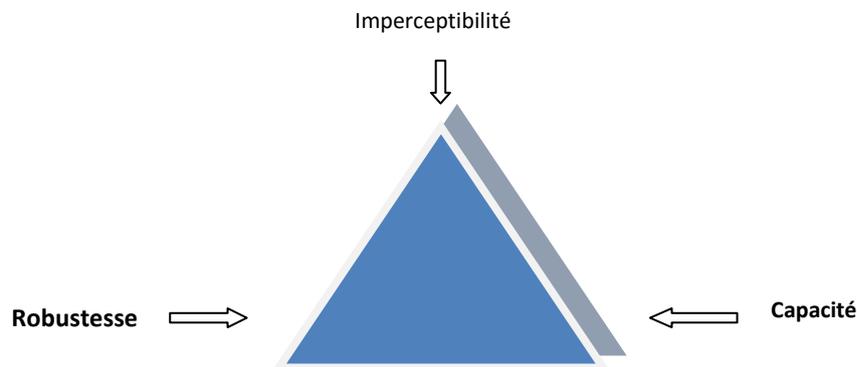


Figure (1.1) : Contraintes du tatouage d'image.

1.4 Schéma général de tatouage numérique

Le schéma de tatouage d'image se décompose en deux phases distinctes illustrées par la figure (1.2).

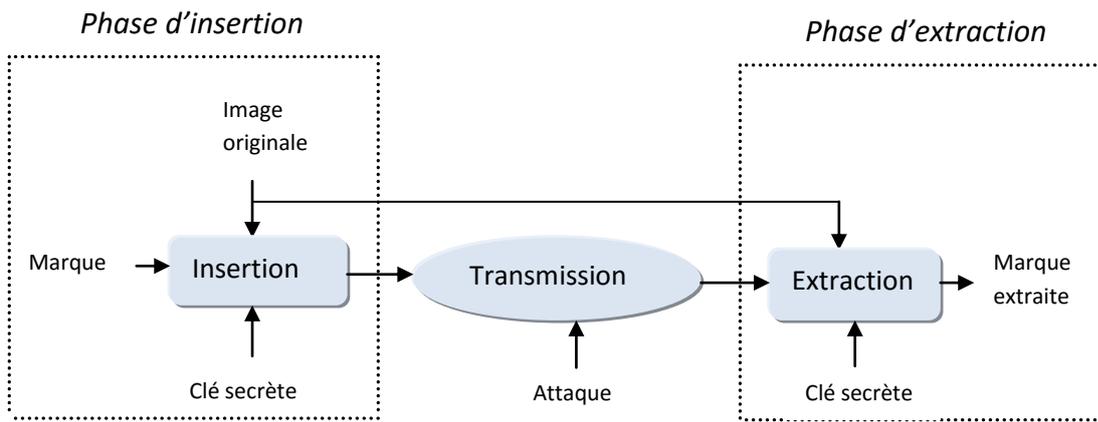


Figure (1.2) : Schéma général de tatouage numérique.

1.4.1 Phase d'insertion

Cette phase consiste à insérer une marque M dans une image originale I_0 avec une clé secrète C_m , pour trouver une nouvelle image appelée image tatouée I_W . Dans cette phase on obtient deux étapes, la génération et l'insertion de la marque [16].

- Génération de la marque : cette étape est effectuée à partir d'une marque : $M = \{M_1, M_2, \dots, M_{N_1}\} \in \mathcal{M}^{N_1}$, et une clé secrète $C_W \in \mathcal{C}_W$. La fonction F_m est une fonction de génération qui génère la marque à insérer :

$$W = \{W_1, W_2, \dots, W_{N_2}\} \in \mathcal{W}^{N_2}$$

$\mathcal{M} = \{-1, +1\}$: alphabets bipolaires.

$\mathcal{M} = \{0,1\}$: alphabets binaires.

La fonction de génération est représentée par la relation mathématique suivante :

$$\mathcal{M}^{N_1} \times \mathcal{C}_W \rightarrow \mathcal{W}^{N_2}$$

$$F_m : (M, C_W) \rightarrow W \quad (1.1)$$

- **Insertion de la marque** : l'insertion de la marque est effectuée dans le domaine DCT en modifiant les coefficients DCT sélectionnés. L'insertion de la marque se fait selon deux règles : la multiplication et la substitution.

1. L'insertion multiplicative : contient les caractéristiques suivantes :

- a) Petite capacité.
- b) L'insertion se fait généralement selon l'une des équations suivantes :

$$S_{W_i} = S_i + \alpha \cdot W_i \quad (1.2)$$

$$S_{W_i} = S_i \cdot (1 + \alpha \cdot W_i) \quad (1.3)$$

$$S_{W_i} = S_i \cdot e^{\alpha \cdot W_i} \quad (1.4)$$

Avec

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\} \in \mathcal{S}^{N_1}$: La séquence de l'image originale I_0

$S_W = \{S_{W_1}, S_{W_2}, \dots, S_{W_N}\} \in \mathcal{S}_W^N$: La séquence de l'image tatouée I_W

$W = \{W_1, W_2, \dots, W_{N_2}\} \in \mathcal{W}^{N_2}$: La séquence de la marque insérée

Avec : $N \geq N_2$

On note alors l'opération d'insertion :

$$S_W = F_I(S, W) \quad (1.5)$$

- c) Un système de détection de la marque basé sur la corrélation.
 - d) Utiliser l'image originale pour améliorer la détection
2. L'insertion par substitution : contient les caractéristiques suivantes :
- a) Grande capacité
 - b) L'insertion se fait par la substitution des composantes de l'image.
 - c) Un système de détection de la marque basé sur l'analyse de redondance.
 - d) Utilisé un code correcteur d'erreur pour améliorer la détection.

1.4.2 Phase d'extraction

Le processus d'extraction est similaire au processus d'insertion. Un dictionnaire de code est généré avec la même taille et de la même clé utilisée dans le processus d'insertion. Dans cette phase on obtient plusieurs types du schéma de tatouage. On distingue le schéma aveugle qui n'a pas besoin de l'image originale pour extraire la marque et le schéma non aveugle qui nécessite l'image originale pour pouvoir lire correctement le message. Enfin le schéma semi-aveugle, où nous avons besoins d'informations supplémentaires pour aider l'extraction, cette demande est due à la perte de synchronisation causée par canal bruité ou par la technique d'insertion. La marque insérée est issue du codage du message à transmettre, il est dépendant d'une clé.

1.4.3 Les attaques considérées dans le tatouage

L'attaque permet d'enlever la trace de la marque, il existe plusieurs types d'attaques:

- **La compression JPEG** : est une technique de compression avec pertes qui supprime les informations des images dont le but de diminuer la taille du fichier image.
- **Ajout de bruit** : on peut distinguer deux types de bruit, le bruit gaussien qui ajoute successivement des valeurs générées aléatoirement à chaque pixel de l'image, le bruit sel & poivre qui transforme aléatoirement les pixels de l'image en pixels noir ou blanc.
- **Filtrage** : les filtres les plus utilisés sont : filtre Gaussien et le filtre médian, qui servent à récupérer une certaine compréhension de l'image.
- **Les transformations géométriques**: peuvent cependant provoquer une perte de synchronisation et ainsi empêcher la détection de la marque.

1.5 Les différentes représentations de l'image

On distingue deux types de représentation de l'image : la représentation spatiale et la représentation fréquentielle.

1.5.1 La représentation spatiale

Chaque pixel (i, j) de l'image originale I_0 est associé à une valeur $I_0(i, j)$. Un pixel de l'image à niveaux de gris peut être représenté par sa luminance, par contre les pixels d'une image couleur sont représentés par trois composants (R, G, B) . Le tatouage dans le domaine spatial est facile à mettre en œuvre, mais trop fragile pour résister aux nombreuses attaques.

1.5.2 La représentation fréquentielle

Le domaine fréquentiel permet d'obtenir une représentation plus adéquate au tatouage numérique. Les transformés les plus fréquemment exploités pour les applications de tatouage d'images sont : le domaine de transformée de Fourier discrète (DFT), le domaine de transformée en cosinus discrète (DCT), le domaine de transformée en ondelettes discrète (DWT)

- **Le domaine DFT** : la DFT est une transformée qui peut être définie en plusieurs dimensions. La DFT s'applique aux signaux discrète périodique, produit un spectre discrète. L'équation (1.6) donne la décomposition d'une image I_0 de taille $N \times M$.

$$\mathfrak{F}_{DFT}(u, v) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \mathfrak{F}_{DFT}^{-1}(n, m) \cdot \exp\left\{-j2\pi\left(\frac{un}{N} + \frac{vm}{M}\right)\right\} \quad (1.6)$$

Avec n, m : sont les coordonnées spatiales.

u, v : sont les coordonnées spectrales.

$$u = (0, 1, \dots, N - 1).$$

$$v = (0, 1, \dots, M - 1).$$

La Transformée de Fourier Discrète inverse :

$$\mathfrak{F}_{DFT}^{-1}(n, m) = \frac{1}{N \times M} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{M-1} \mathfrak{F}_{DFT}(u, v) \exp\left\{j2\pi\left(\frac{un}{N} + \frac{vm}{M}\right)\right\} \quad (1.7)$$

- **Le domaine DCT** : la DCT est proche de la transformée de Fourier, mais possède des propriétés intéressantes qui la rende parfois plus adaptée à certaines opérations de traitement du signal et notamment de l'image. Ces propriétés sont :
 1. Transformée à coefficients réelles.
 2. Transformation sans pertes (le signal original peut être retrouvé à l'identique par transformée inverse).
 3. Concentration de l'information dans les coefficients de basse fréquence.

La formule de la DCT est notée par la relation suivante :

$$\mathfrak{F}_{DCT}(u, v) =$$

$$\frac{2}{\sqrt{NM}} C(u)C(v) \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \mathfrak{F}_{DCT}^{-1}(n, m) \cdot \cos\left(\frac{(2n+1)u\pi}{2N}\right) \cdot \cos\left(\frac{(2m+1)v\pi}{2M}\right) \quad (1.8)$$

Avec

$$C(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & u = 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

$C(u)$ et $C(v)$: les facteurs d'orthogonalité de la Transformée.

La formule DCT inverse est donnée par la relation suivante :

$$\mathfrak{S}_{DCT}^{-1}(n, m) = \frac{2}{\sqrt{NM}} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{M-1} \mathfrak{S}_{DCT}(u, v) C(u) C(v) \cdot \cos\left(\frac{(2n+1)u\pi}{2N}\right) \cdot \cos\left(\frac{(2m+1)v\pi}{2M}\right) \quad (1.9)$$

- **Le domaine DWT :** une ondelette est une fonction à base de la décomposition en ondelettes. La transformée en ondelettes est similaire à la transformée de Fourier. La différence principale entre les deux transformations est que la transformée de Fourier décompose le signal en fonctions localisées en fréquence, par contre la transformée en ondelettes utilise des fonctions localisées à la fois en temps et en fréquence. La transformée en ondelettes discrète peut être utilisée pour d'ébruiter facilement et rapidement un signal. Si nous ne prenons qu'un nombre limité des coefficients les plus élevés dans le spectre de la transformée, et que nous appliquons la transformée inverse nous pouvons obtenir un signal plus ou moins d'ébruité. Il existe plusieurs façons de choisir les coefficients qui seront conservés : le seuillage universel, le seuillage adaptatif. La formule de la DWT est donnée par la relation suivante.

$$\mathfrak{S}_{DWT}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{t=-\infty}^{+\infty} x(t) l_{a,b}(t) dt \quad (1.10)$$

$l_{a,b}(t)$: est obtenue par translation et dilatation d'une ondelette mère.

Avec $l_{a,b}(t) = l\left(\frac{t-b}{a}\right)$

b : représente la position. a : représente l'échelle. a : Non nul.

La figure (1.3), représente la décomposition en un niveau de résolution et la reconstruction d'un signal $x(n)$ en utilisant la transformée en ondelettes discrète.

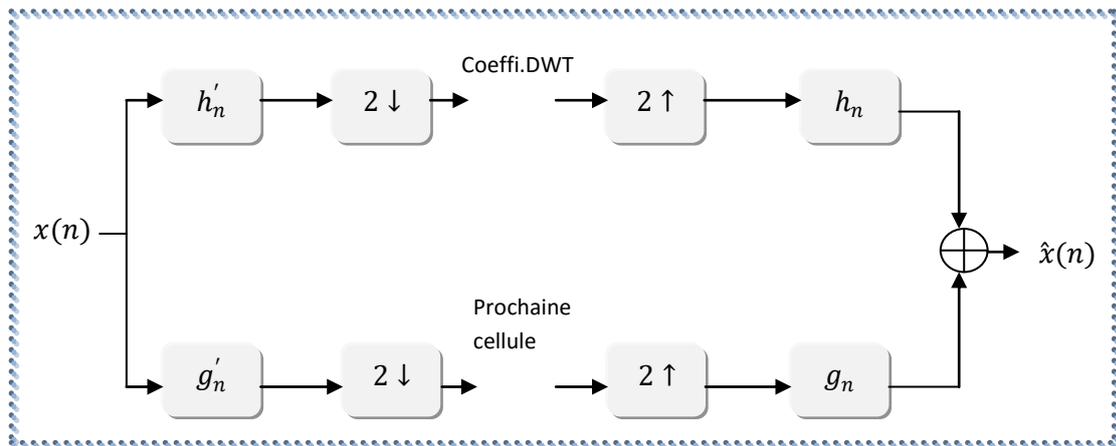
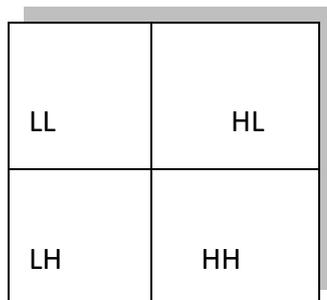


Figure (1.3) : Banc de filtres à deux bandes.

Le filtre passe-bas est représenté par h'_n et le filtre passe-haut est représenté par g'_n et l'opération de décimation d'un facteur 2 est représentée par $2 \downarrow$ et $2 \uparrow$ représente l'interpolation qui consiste à intercaler un zéro entre deux échantillons.

La décomposition de niveau simple de l'image donne quatre représentations de fréquence. Ces quatre représentations s'appellent les sous bande, LL, LH, HL, HH, comme montre la figure (1.4).



(a)



(b)

Figure (1.4) : (a) Décomposition en DWT à un niveau. (b) Décomposition en DWT à un niveau de l'image Lina.

- La transformée en ondelettes discrète basé sur le schéma de lifting LWT (*lifting wavelettransform*) : LWT est une seconde génération d'ondelettes, cette

transformation permet d'effectuer la transformée en ondelettes sans le banc de filtres, qui est remplacé par un certain nombre d'étapes comme la transformée en ondelettes classique, la prédiction, la mise à jour et la mise en échelle des coefficients. La transformée en ondelettes classique décompose le signal d'entrée x_k en échantillons pairs s_k^n et en échantillons impairs d_k^n :

$$s_k^n = x_{2k} \quad (1.11)$$

$$d_k^n = x_{2k+1} \quad (1.12)$$

Avec : $n \in [1, N]$

Une opération de prédiction qui prédit les échantillons impairs d_k^n à partir des échantillons pairs voisins s_k^n .

Une opération de mise à jour de s_k^n est réalisée avec les séquences prédites.

$$d_k^n = d_k^{n-1} + \sum_l P_n(L) \cdot s_l^{n-1} \quad (1.13)$$

$$s_k^n = s_k^{n-1} + \sum_l U_n(L) \cdot d_l^n \quad (1.14)$$

Avec $P_n(L)$: Les coefficients de prédiction.

$U_n(L)$: Les coefficients de mise à jour.

Une opération de mise en échelle des coefficients de prédiction et de mise à jour permet d'ajuster les amplitudes des coefficients, on obtient aussi les filtres passe-haut et les filtres passe-bas.

1.6 Applications du tatouage numérique d'images

Les applications du tatouage numérique des images sont nombreuses, leur diversité fait que les contraintes qu'elles imposent varient selon l'application envisagée, parmi celle-ci on peut distinguer :

- Protection du droit d'auteur, pour cela il faut :
 - Assurer une grande robustesse contre les attaques.
 - Minimiser les distorsions liées à l'insertion de la marque.

- Authentification : la marque permet d'assurer que le contenu de l'image est authentique, il s'agit d'une marque fragile, qui subit des distorsions si l'image a été altérée.
- Information sur le support : la marque peut contenir des données publiques informatives sur l'œuvre, date, adresse électronique, cette application interviendrait en complément d'une protection de la propriété.
- Autres applications : il existe d'autres applications telles que la, protection de copie, le contrôle de copie, intégrité, estampillage, indexation, gestion des transactions.

1.7 Classification des algorithmes du tatouage

La classification des algorithmes de tatouage numérique peut se faire selon différents critères tels que : le domaine d'insertion, la robustesse, la technique d'insertion, le mode d'extraction, la perception de la marque et la préservation de l'image originale [8]. La figure (1.5) représente un organigramme de cette classification.

1.7.1 Classification selon la robustesse

Dans cette classification on obtient trois catégories de tatouage numérique robuste, fragile et semi-fragile. Un tatouage robuste recherche à préserver la marque insérée face aux attaques malveillantes ou bienveillantes, ce type de tatouage est utilisé pour la vérification du droit d'auteur. Le tatouage semi-fragile doit résister à une compression **JPEG** avec un haut niveau de qualité, ce type de tatouage est utilisé pour la vérification de l'authenticité des images. Le tatouage fragile doit détecter les changements survenus sur une image, il ne doit pas résister à une modification du contenu de l'image, ce type de tatouage est utilisé pour la vérification de l'authenticité des documents.

1.7.2 Classification selon la perception de la marque

Toutes les techniques de tatouage d'images peuvent être classées comme des techniques de tatouage visibles ou invisibles. Le tatouage visible consiste à insérer une marque sur une région d'intérêt de l'image originale, le tatouage invisible modifie l'image d'une manière imperceptible pour l'utilisateur. Dans la technique de tatouage visible il est facile de faire la différence entre l'image originale et l'image tatouée, par contre dans la technique de tatouage invisible il est difficile de faire la distinction entre l'image originale et l'image tatouée, la marque insérée est difficilement enlevée sans avoir une dégradation de la qualité visuelle de l'image tatouée.

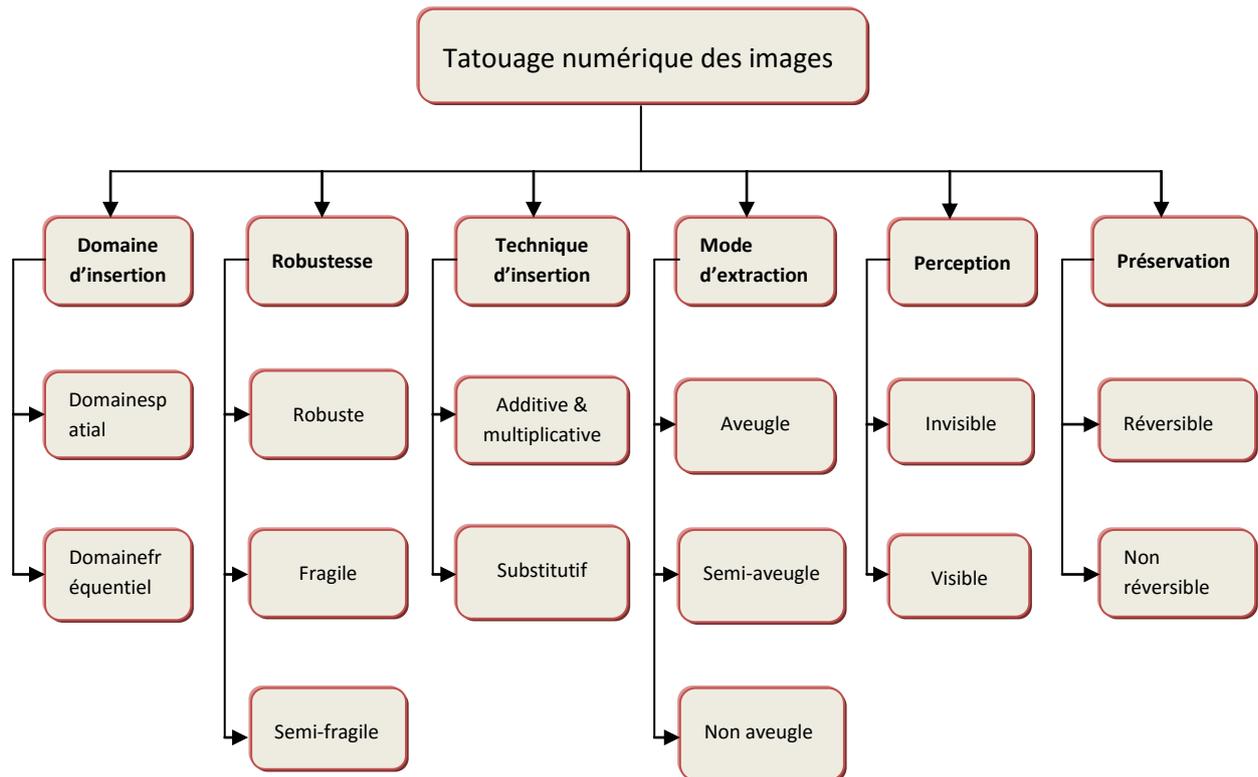


Figure (1.5) : Classification des algorithmes de tatouage d'image.

1.7.3 Classification selon la technique d'insertion

Les schémas de tatouage numérique peuvent être groupés en deux classes, les schémas additifs et les schémas substitutifs. Dans le schéma additif, l'insertion peut s'effectuer soit directement sur l'image, dans le domaine spatial, soit dans un domaine fréquentiel. De ce fait, adapter la marque à l'objet d'origine est une contrainte essentielle à respecter pour que le signal qu'elle représente ne soit ni trop faible ni trop fort. Dans [3] Huang et Zhang, ont proposé une méthode de détection statistique pour les schémas multiplicatifs d'étalement du spectre dans le domaine fréquentiel, cette technique apporte une solution pour transmettre un message à cacher dans un contenu. Dans les modes substitutifs, l'information à insérer est substituée à des caractéristiques de l'image.

1.7.4 Classification selon la préservation de l'image originale

Les techniques de tatouage peuvent être séparées en deux catégories, les méthodes réversibles et les méthodes non réversibles. Les méthodes réversibles sont capables de fournir un duplicata exact de l'image originale. Dans les méthodes non réversibles, l'image originale est définitivement altérée par le mécanisme d'insertion, la matrice originale de pixels est irrécupérable. La plupart des méthodes existant sont non réversibles.

1.7.5 Classification selon le domaine d'insertion

Les techniques de tatouage numérique courantes décrites dans la littérature peuvent être regroupées en deux principales classes, techniques travaillant dans le domaine spatial et techniques travaillant dans le domaine fréquentiel.

a. Domaine spatial

Dans le domaine spatial, la marque est insérée en modifiant les LSB (bits de poids faible). Les images sont en général manipulées en modifiant un ou plusieurs bits de l'octet constituant les pixels de l'image. Pour une image codée sur 8 bits de poids, une modification du LSB entraîne une variation du niveau de gris de 1 sur une échelle de 256. Cette méthode d'insertion consiste alors à supprimer tous les bits de poids faible de l'image à marquer, puis à y insérer les données voulues, un bit de donnée est ainsi inséré par pixel de l'image.

Le tatouage dans le domaine spatial est facile à mettre en œuvre, mais trop fragile pour résister aux nombreuses attaques, par exemple l'ajout de bruit peut facilement dégrader la qualité de l'image ou de supprimer la marque.

b. Domaine fréquentiel

Les techniques de tatouage qui travaillent dans le domaine fréquentiel sont plus robustes. Les domaines transformés les plus fréquemment exploités pour les applications de tatouage numérique des images sont : le domaine de transformée de Fourier discrète (DFT), le domaine de transformée en Cosinus discrète (DCT), le domaine de transformée en Ondelette discrète (DWT), le domaine de transformée de Hadamard discrète (DHT).

- **Domaine de DFT** : la transformée de Fourier d'une image peut-être représentée par deux composantes l'amplitude et la phase. Une attaque opérant dans la phase du spectre dégraderait rapidement la qualité de l'image, le tatouage de la phase du spectre provient de la théorie de la communication ou la modulation de la phase possède une meilleure immunité au bruit que la modulation d'amplitude. L'insertion s'effectue dans les moyennes fréquences, les basses fréquences ne sont pas modifiées pour éviter des dégradations visuelles trop importantes. En 1999, Ramkumar et al [4] ont proposé d'insérer une marque binaire en modifiant seulement le module des coefficients de la

DFT. En 1982, Hayes [5] a étudié l'importance relative aux composantes de la DFT et leur effet sur l'image.

- **Domaine de DCT** : la DCT offre une bonne robustesse à des attaques telles que le filtrage, la compression JPEG. En 1999, Koch et al [6] ont présenté un algorithme de tatouage numérique basé sur la DCT, l'image originale est divisée en blocs de taille 8×8 pixels puis la DCT est calculée pour chaque bloc.
- **Domaine de DWT** : la transformée en ondelettes est une description multi-résolution d'une image, elle décompose l'image en plusieurs sous-bandes dans trois directions, horizontale, verticale et diagonale. L'importance des coefficients de DWT est plus grande dans les bandes (LL) à chaque niveau de décomposition et est plus petite pour d'autres bandes.
- **Domaine de DHT** : Falkowski et Lim [7] ont présenté un schéma de tatouage en utilisant la transformée de Hadamard complexe (CHT), dans ce schéma l'image originale est décomposée en plusieurs bandes de fréquences (basse-basse, basse-haute, haute-basse, haute-haute) en utilisant la transformée de Hadamard multi-résolution, la bande de basses fréquences est segmentée en blocs de taille 8×8 pixels, ensuite la transformée de Hadamard complexe est calculée pour chaque bloc.

1.8 Critères d'évaluation

Il faut évaluer les algorithmes de tatouage numérique pour bien comparé entre l'image originale et l'image tatouée et aussi entre la marque originale et la marque extraite. En termes de l'imperceptibilité, les critères d'évaluation des algorithmes de tatouage numérique sont :

- **Erreur quadratique moyenne (MSE)** : il est défini comme suit :

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_0(i,j) - I_W(i,j))^2}{M \cdot N} \quad (1.15)$$

- **Rapport signal sur bruit (PSNR)** : Ce rapport évalue la dégradation en dB de l'image originale provoquée par l'insertion de la marque. Le PSNR est défini comme suit :

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (1.16)$$

- **La similarité structurale (SSIM)** : la similarité structurale est représentée par la relation mathématique suivante :

$$SSIM = \left(\frac{2\mu_{I_0}\mu_{I_W} + C_1}{\mu_{I_0}^2 + \mu_{I_W}^2 + C_1} \right) \cdot \left(\frac{2\sigma_{I_0}\sigma_{I_W} + C_2}{\sigma_{I_0}^2 + \sigma_{I_W}^2 + C_2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{I_0 I_W} + C_3}{\sigma_{I_0}\sigma_{I_W} + C_3} \right) \quad (1.17)$$

Avec μ_{I_0} et μ_{I_W} sont respectivement la moyenne des matrices I_0 et I_W , σ_{I_0} et σ_{I_W} sont respectivement l'écart type des matrices I_0 et I_W , $\sigma_{I_0 I_W}$ représente la covariance entre les matrices I_0 et I_W , et C_1, C_2, C_3 sont des constantes positives.

- **La corrélation normalisée (NC)** : la corrélation normalisée calcule la mesure de similarité entre la marque originale et la marque extraite qui est défini par :

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W(i, j) \cdot \hat{W}(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W(i, j)^2} \quad (1.18)$$

- **Le rapport des bits corrects (BCR)** : le rapport des bits correct est défini par la relation mathématique suivante :

$$BCR = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \overline{W(i, j) \oplus \hat{W}(i, j)}}{M \times N} \times 100 \quad (1.19)$$

Avec \oplus signifie l'opération d'addition bit par bit modulo 2.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technologie du tatouage numérique d'une manière générale. Nous nous sommes intéressés à la classification des algorithmes de tatouage numérique, nous avons présenté la classification selon la robustesse qui regroupe le tatouage robuste, fragile et semi-fragile, la classification selon la perception de la marque, la technique d'insertion et aussi selon la préservation de l'image originale, et enfin la classification selon le mode d'insertion.

2 CHAPITRE 2 Algorithmes de Tatouage numérique Basés sur la décomposition SVD

2.1 Introduction

La décomposition en valeurs singulières SVD est très utilisée en traitement des images grâce notamment à ses propriétés algébriques.

Dans ce chapitre, on présente l'algorithme spatial de tatouage numérique basé sur les techniques suivantes :

- La décomposition en valeurs singulières (SVD) de Aslantas [8].
- La décomposition SVD et la transformée en ondelettes discrète (DWT) de [9].
- La décomposition en valeurs singulières (SVD) et la transformée de Fourier discrète (DFT) qui été proposé par Dodi Sudiana et Darmawan Apriyadi [10].
- La décomposition en valeurs singulières (SVD) et la transformée en ondelettes basé sur le schéma de lifting (LWT) [11].

Dans cet algorithme on utilise la transformée en ondelettes basé sur le schéma de lifting (LWT) pour la réduction du temps de calcul par apport à la transformée en ondelettes discrète (DWT). Pour accroître l'imperceptibilité on a choisi d'insérer la marque en utilisant les valeurs singulières.

2.2 Décomposition en valeurs singulières SVD

La théorie de la décomposition en valeurs singulières a été établie pour les matrices réelles carrées dans les années 1870 par Beltrami et Jordan et pour les matrices complexes par Autonne en 1902. La décomposition en valeurs singulières repose sur un théorème d'algèbre linéaire qui dit qu'une matrice rectangulaire \mathbf{I}_0 représentant une image I_0 de taille $N \times N$ peut être exprimée comme le produit de trois matrices, une matrice orthogonale \mathbf{U} , une matrice diagonale \mathbf{S} et la transposée d'une matrice orthogonale \mathbf{V} . On obtient la décomposition en valeurs singulières dont les applications en traitement d'image sont diverses comme la compression, la dissimulation, réduction du bruit. La décomposition SVD d'une matrice \mathbf{I}_0 est donnée par :

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}^T = \sum_{k=1}^N u_k \cdot s_k \cdot v_k \quad (2.1)$$

Avec : $\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_N]$, $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_N]$ et $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & s_N \end{bmatrix}$

Les matrices \mathbf{U} et \mathbf{V} sont des matrices orthogonales, $U^T U = I$ et $V^T V = I$. La matrice diagonale \mathbf{S} de dimension $N \times N$, est composée des valeurs singulières telle que: $S = \text{diag}(s_i)$ et que: $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_N \geq 0$.

On peut citer plusieurs intérêts à l'utilisation de la décomposition SVD pour le traitement d'images :

- Les valeurs singulières représentent l'énergie de l'image, c'est-à-dire que la SVD range le maximum d'énergie de l'image dans un minimum de valeurs singulières.
- Les valeurs singulières d'une image ont une très bonne stabilité, c'est-à-dire que quand une petite perturbation (par exemple une marque) est ajoutée à une image, les valeurs singulières ne changent pas significativement.
- En plus, la factorisation en SVD est unique.

Algorithmes de tatouage numérique basés sur la SVD

Il existe plusieurs algorithmes de tatouage numérique qui sont basés sur la décomposition en valeurs singulières.

2.2.1 Algorithme spatial de tatouage numérique basé sur la SVD

On présente l'algorithme spatial de tatouage numérique basé sur la SVD de Aslantas [8].

Dans cet algorithme on utilise deux procédures, procédure d'insertion et procédure d'extraction. La procédure d'insertion est représentée par la figure (2.1) et elle consiste à :

- Décomposition en valeurs singulières de l'image originale I_0 :

$$I_0 = U \cdot S \cdot V^T \quad (2.2)$$

- Multiplier la matrice qui représente la marque W par un facteur d'insertion α , puis l'ajouter à la matrice S :

$$S_M = S + \alpha \cdot W \quad (2.3)$$

- Décomposition en valeurs singulières sur la marque S_M :

$$S_M = U_W \cdot S_W \cdot V_W^T \quad (2.4)$$

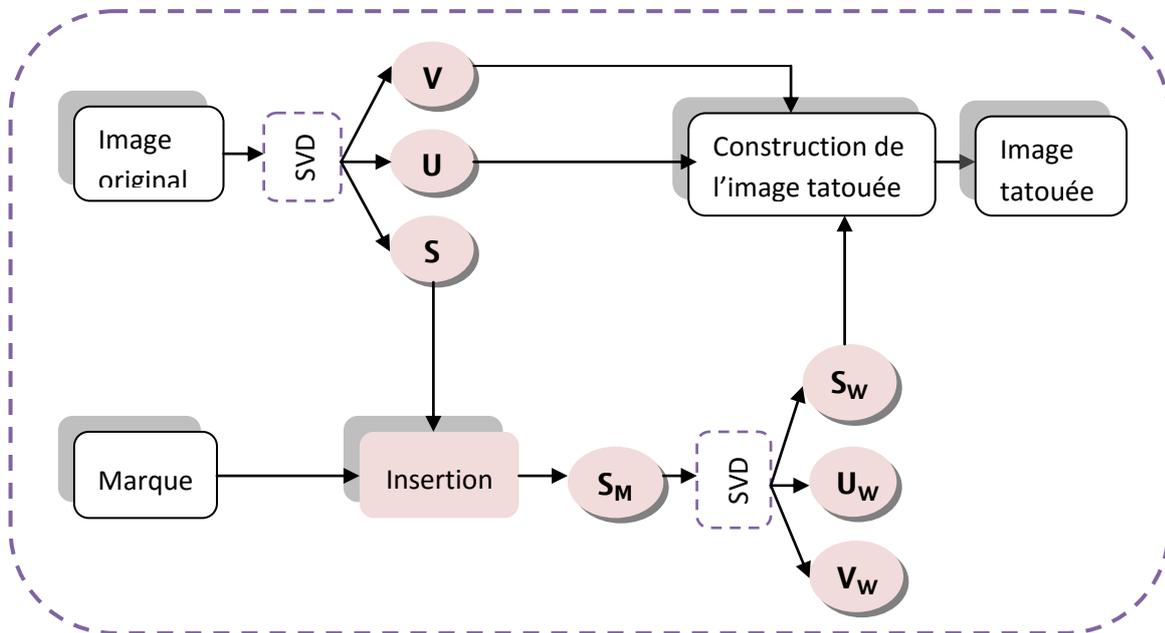


Figure (2.1) : Procédure d'insertion de l'algorithme spatial basé sur la SVD de Aslantas [8].

- Calculer la matrice qui représente l'image tatouée par l'équation suivante :

$$I_W = U \cdot S_W \cdot V^T \quad (2.5)$$

La procédure d'extraction de l'algorithme spatial basé sur la SVD est représentée par la figure (2.2), et elle consiste à :

- Décomposition en valeurs singulières sur l'image tatouée I_W^* (probablement attaquée):

$$I_W^* = U^* \cdot S_W^* \cdot V^{*T} \quad (2.6)$$

- Calculer la matrice S_M^* (possiblement corrompue) par l'équation suivante :

$$S_M^* = U_W \cdot S_W^* \cdot V_W^T \quad (2.7)$$

- Extraire la marque \hat{W} (possiblement déformée) par la relation suivante :

$$\hat{W} = \frac{(S_M^* - S)}{\alpha} = \frac{(U_W \cdot S_W^* \cdot V_W^T - S)}{\alpha} \quad (2.8)$$

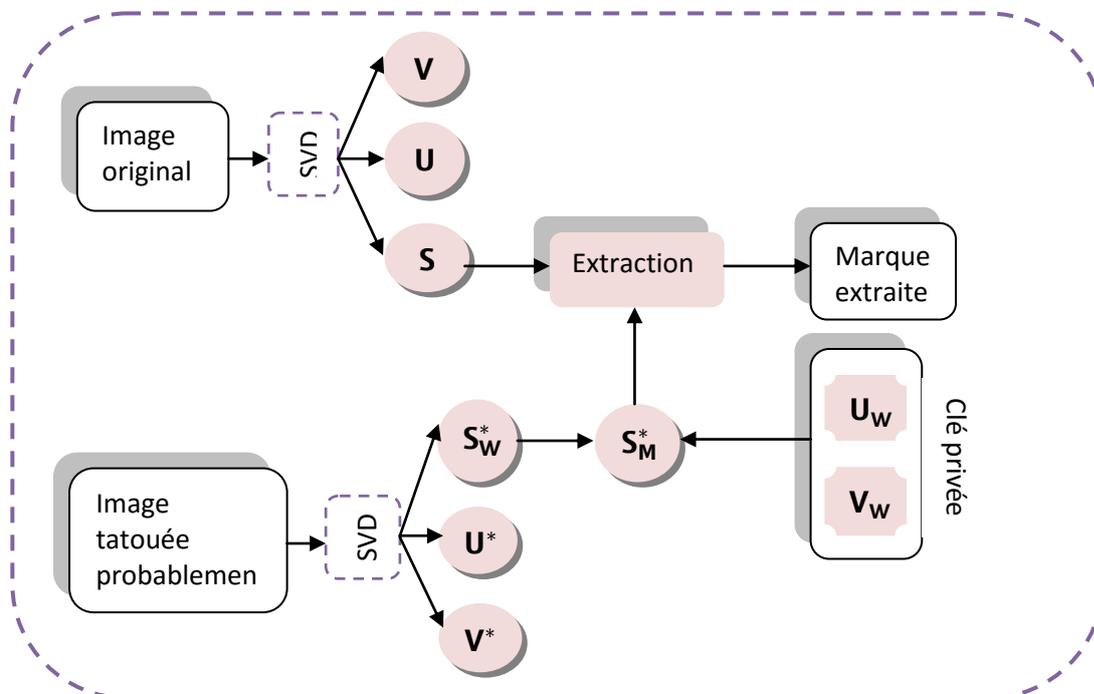


Figure (2.2) : Procédure d'extraction de l'algorithme spatial basé sur la SVD de Aslantas [8].

2.2.2 Algorithme de tatouage numérique basé sur la SVD et la DWT

La décomposition en ondelette est généralement employée pour la fusion des images, et c'est notamment le cas dans le tatouage numérique en fusionnant l'image originale et la marque. Dans cette section on présente l'algorithme de tatouage numérique basé sur la SVD et la DWT de [9]. Cet algorithme contient deux procédures fondamentales, procédure d'insertion, et procédure d'extraction.

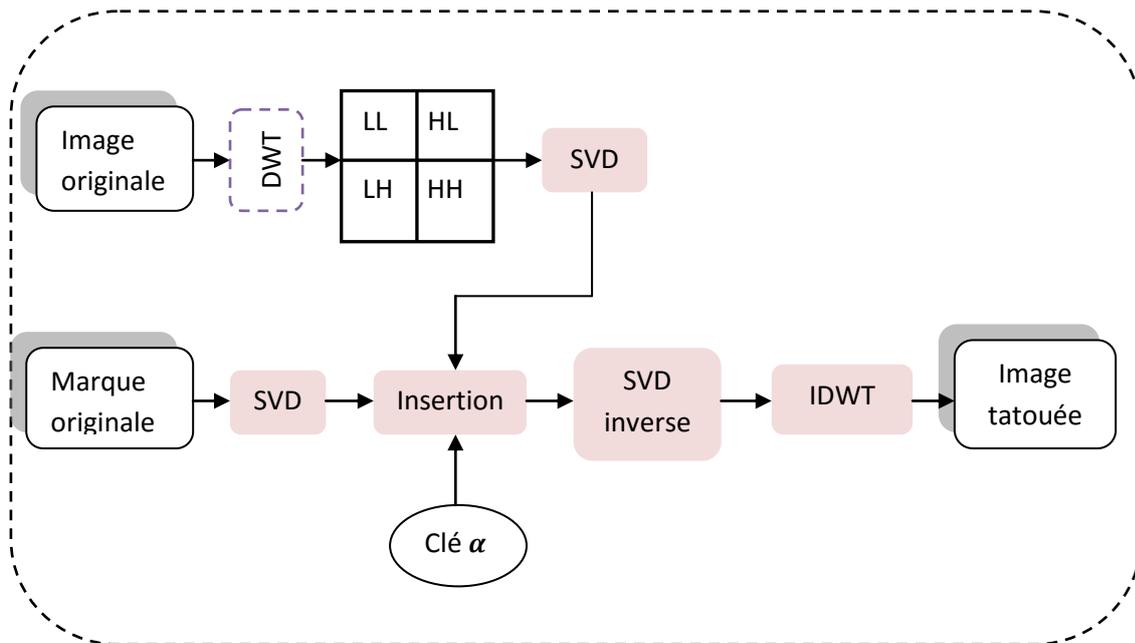


Figure (2.3) : procédure d'insertion de l'algorithme de tatouage numérique basé sur la SVD et DWT de [9].

La procédure d'insertion représentée par la figure (2.3), est décrite comme suit:

- Utiliser la transformée DWT pour décomposer l'image originale I_0 en quatre sous-bandes : LL, HL, LH et HH.
- Appliquer la SVD pour chaque sous-bande :

$$I_k = U_k \cdot S_k \cdot V_k^T \quad (2.9)$$

Avec k : LL, HL, LH et HH.

- La décomposition de la marque en valeurs singulières :

$$W = U_w \cdot S_w \cdot V_w^T \quad (2.10)$$

- Modifier les composantes DC des quatre sous-bandes selon l'équation suivante

$$d_W^i = d_0^i + \beta \cdot \lambda_W^i \quad (2.11)$$

Avec d_0^i et d_W^i sont respectivement les composantes originales et modifiées de la DC, et λ_W^i sont les valeurs singulières de la matrice \mathbf{W} représentant l'image marquée \mathbf{W} et β est une constante.

- Appliquer la SVD inverse pour les quatre sous-bandes modifiées.

Calculer la transformée inverse de la DWT afin de produire l'image tatouée I_W .

Pour la procédure d'extraction de la marque illustrée par la figure (2.4), suit les étapes suivantes :

- Refaire les deux premières étapes de la procédure d'insertion pour l'image originale et l'image tatouée I_W^* (probablement attaquée).
- Utiliser la transformée DWT pour décomposer l'image tatouée I_W^* (probablement attaquée) en quatre sous-bandes.
- Appliquer la SVD pour chaque sous-bande :

$$I_k^* = U_k^* \cdot S_k^* \cdot V_k^{*T} \quad (2.12)$$

- Extraire les valeurs singulières de chaque sous-bande :

$$\lambda_W = \frac{\lambda_k^* - \lambda_k}{\alpha} \quad (2.13)$$

- Construire les quatre marques à partir des valeurs singulières extraites des quatre sous-bandes :

$$\hat{W}_k = U_W \cdot S_k^* \cdot V_W^T \quad (2.14)$$

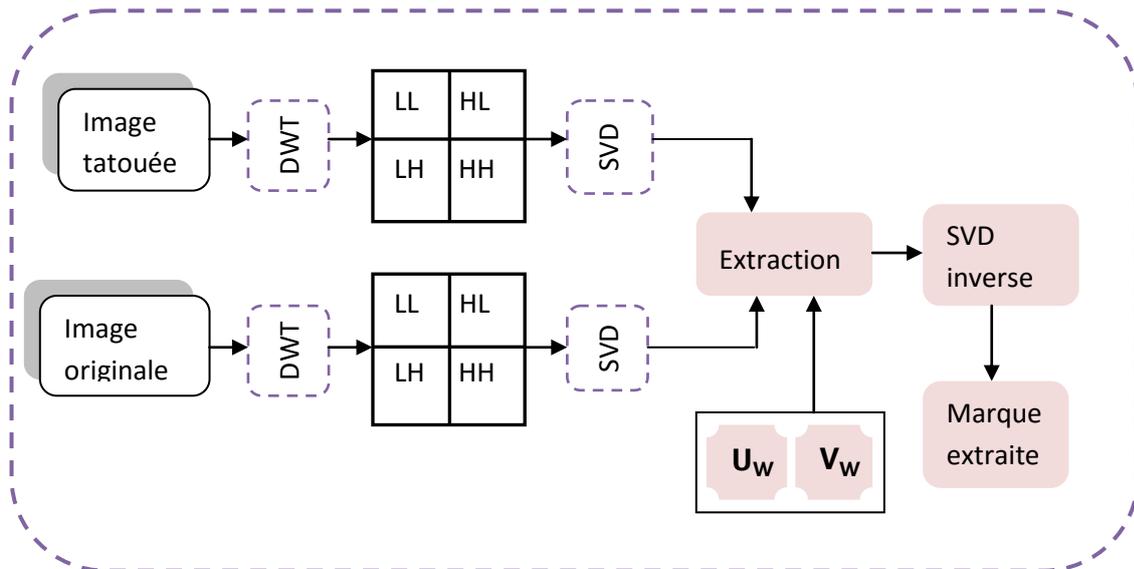


Figure (2.4) : Procédure d'extraction de l'algorithme de tatouage numérique basé sur la DWT et la SVD de [9].

2.2.3 Algorithme de tatouage numérique basé sur la SVD et la DFT

Dans cette section, on présente l'algorithme de tatouage numérique basé sur la transformée de Fourier discrète (DFT) et la décomposition en valeurs singulières (SVD) qui été proposé par Dodi Sudiana et Darmawan Apriyadi [10]. La procédure d'insertion de la marque est représentée par la figure (2.5).

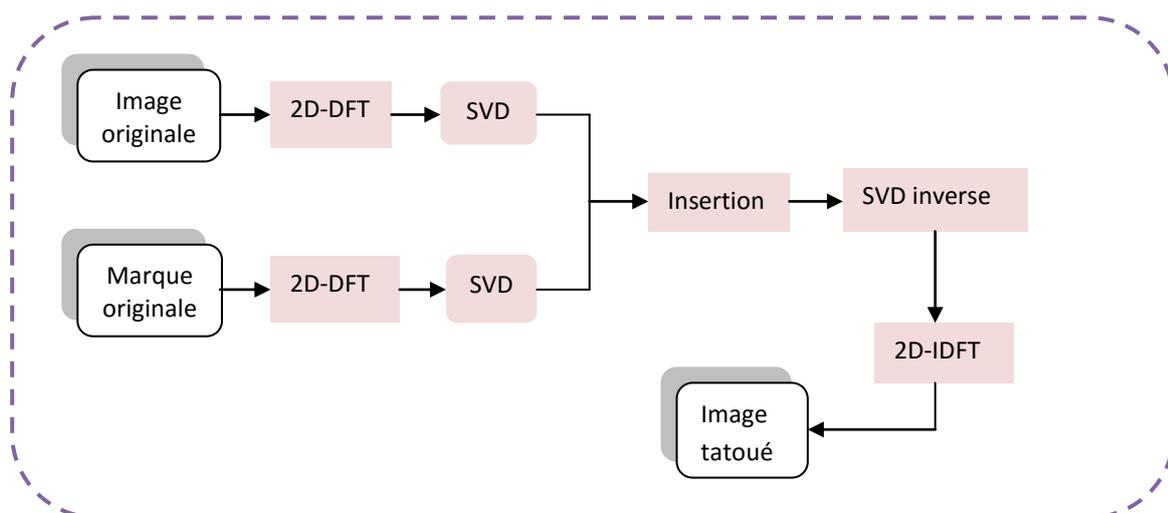


Figure (2.5) : Procédure d'insertion de l'algorithme de tatouage basé sur la SVD, DWT [10].

La procédure d'extraction de la marque est représentée par la figure (2.6).

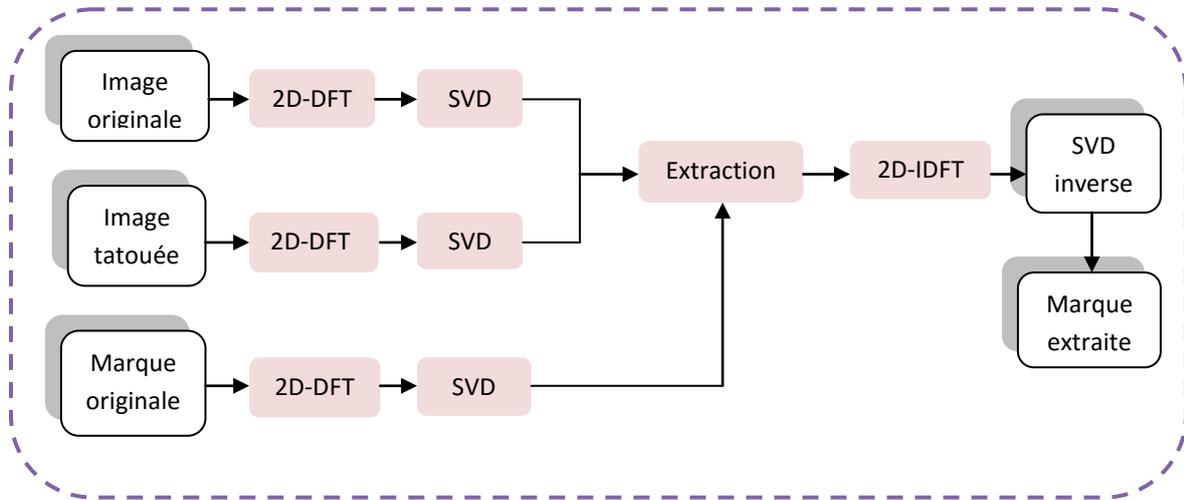


Figure (2.6) : Procédure d'extraction de la marque de l'algorithme de tatouage numérique basé sur la SVD et la DFT [10].

2.2.4 Algorithme de tatouage numérique proposé basé sur la SVD et la LWT

Cet algorithme de tatouage numérique est basé sur la décomposition SVD et la transformée en ondelettes lifté LWT. Il contient comme d'habitude deux procédures, procédure d'insertion et procédure d'extraction. La procédure d'insertion de la marque est représentée par la figure (2.7), et voici les étapes :

- Utiliser la transformée en ondelettes basé sur le schéma de lifting pour décomposer l'image originale I_0 en trois niveaux de résolution : HH1, HL1, LH1, HH2, HL2, LH2, HH3, HL3, LH3, LL3.
- Choisir une sous-bande **sb** parmi les sous-bandes suivantes : HH3, HL3, LH3.
- Calculer la transformée en ondelettes inverse basé sur le schéma de lifting de la sous-bande choisi.

$$\mathbf{Z} = \mathfrak{J}_{LWT}^{-1}(\mathbf{sb}) \quad (2.15)$$

- Appliquer la SVD sur la matrice \mathbf{Z} :

$$\mathbf{Z} = \mathbf{U}_Z \cdot \mathbf{S}_Z \cdot \mathbf{V}_Z^T \quad (2.16)$$

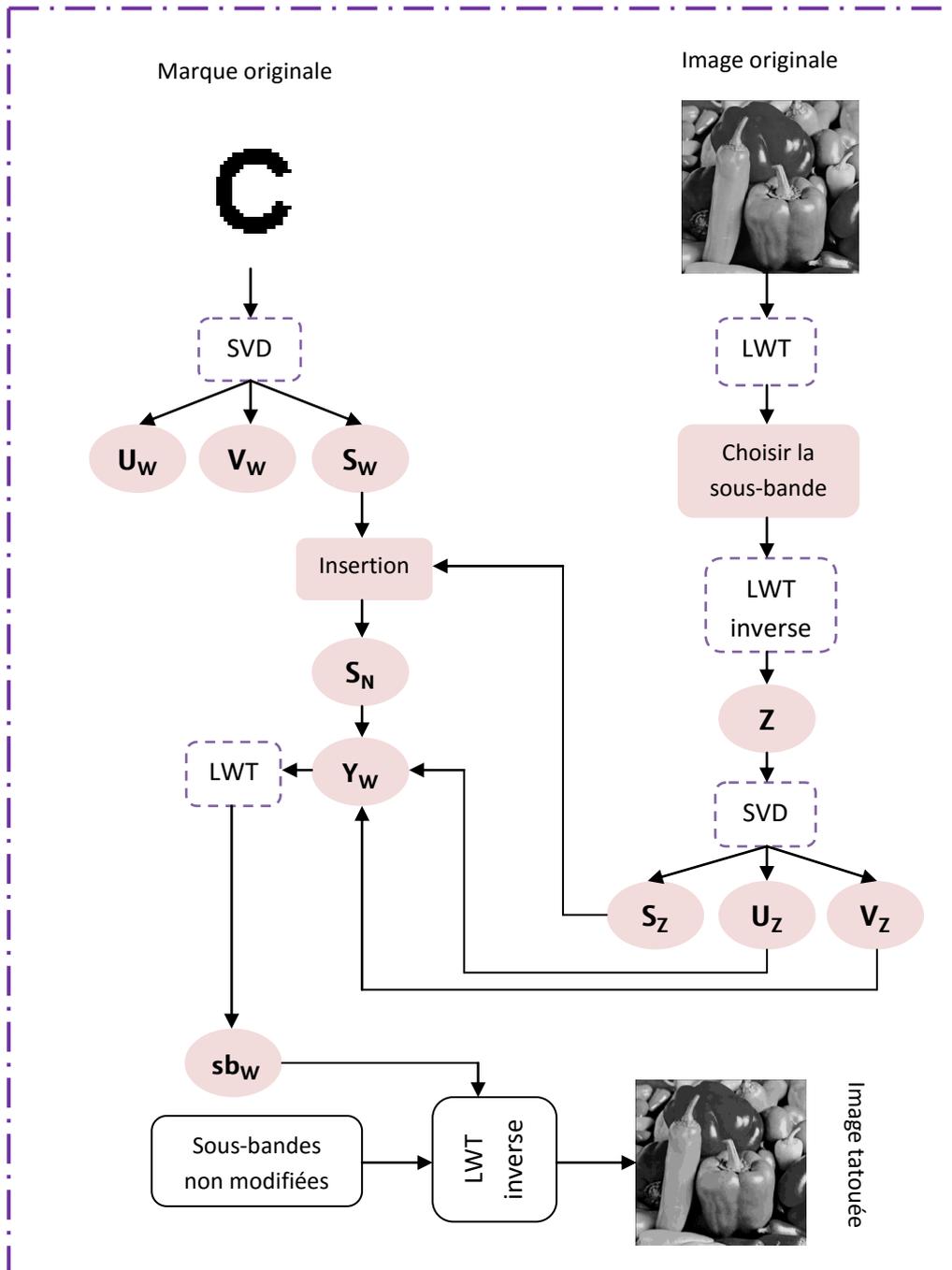


Figure (2.7) : Procédure d’insertion de l’algorithme de tatouage numérique proposé basé sur la SVD et la LWT [11].

- Appliquer la SVD sur la matrice qui représente la marque W :

$$W = U_W \cdot S_W \cdot V_W^T \tag{2.17}$$

- Multiplier la matrice \mathbf{S}_W par un facteur d'insertion α , et ajouter le résultat à la matrice \mathbf{S}_Z

$$\mathbf{S}_N = \mathbf{S}_Z + \alpha \cdot \mathbf{S}_W \quad (2.18)$$

- Calculer la matrice \mathbf{S}_Y par l'équation suivante :

$$\mathbf{Y}_W = \mathbf{U}_Z \cdot \mathbf{S}_N \cdot \mathbf{V}_Z^T \quad (2.19)$$

- Calculer la LWT de la matrice \mathbf{Y}_W :

$$\mathbf{sb}_W = \mathfrak{S}_{LWT}(\mathbf{Y}_W) \quad (2.20)$$

- La matrice \mathbf{I}_W de l'image tatouée I_W est calculée en appliquant la LWT^{-1} à trois niveaux de résolution en utilisant la sous-bande modifiée \mathbf{sb}_W et les 9 sous-bandes non modifiées.
- Calculer les mesures objectives entre l'image originale et l'image tatouée.

En ce qui concerne l'extraction de la marque représentée par la figure (2.8), la procédure est la suivante :

- Refaire les cinq premières étapes de la procédure d'insertion.
- Utiliser la transformée LWT pour décomposer l'image tatouée I_W^* (probablement attaquée) en trois niveaux de résolution : HH1, HL1, LH1, HH2, HL2, LH2, HH3, HL3, LH3, LL3.
- Choisir une sous-bande $\mathbf{sb1}$ parmi les sous-bandes suivante : HH3, HL3, LH3.
- Calculer la transformée LWT^{-1} inverse de la sous-bande choisi :

$$\mathbf{Z1} = \mathfrak{S}_{LWT}^{-1}(\mathbf{sb1}) \quad (2.21)$$

- Appliquer la SVD sur la matrice $\mathbf{Z1}$:

$$\mathbf{Z1} = \mathbf{U}_{Z1} \cdot \mathbf{S}_{Z1} \cdot \mathbf{V}_{Z1}^T \quad (2.22)$$

- Appliquer la SVD sur la matrice qui représente la marque \mathbf{W} :

$$\mathbf{W} = \mathbf{U}_W \cdot \mathbf{S}_W \cdot \mathbf{V}_W^T \quad (2.23)$$

- La matrice \mathbf{S}_D est calculée par l'équation suivante :

$$\mathbf{S}_D = \frac{\mathbf{S}_{Z1} - \mathbf{S}_Z}{\alpha} \quad (2.24)$$

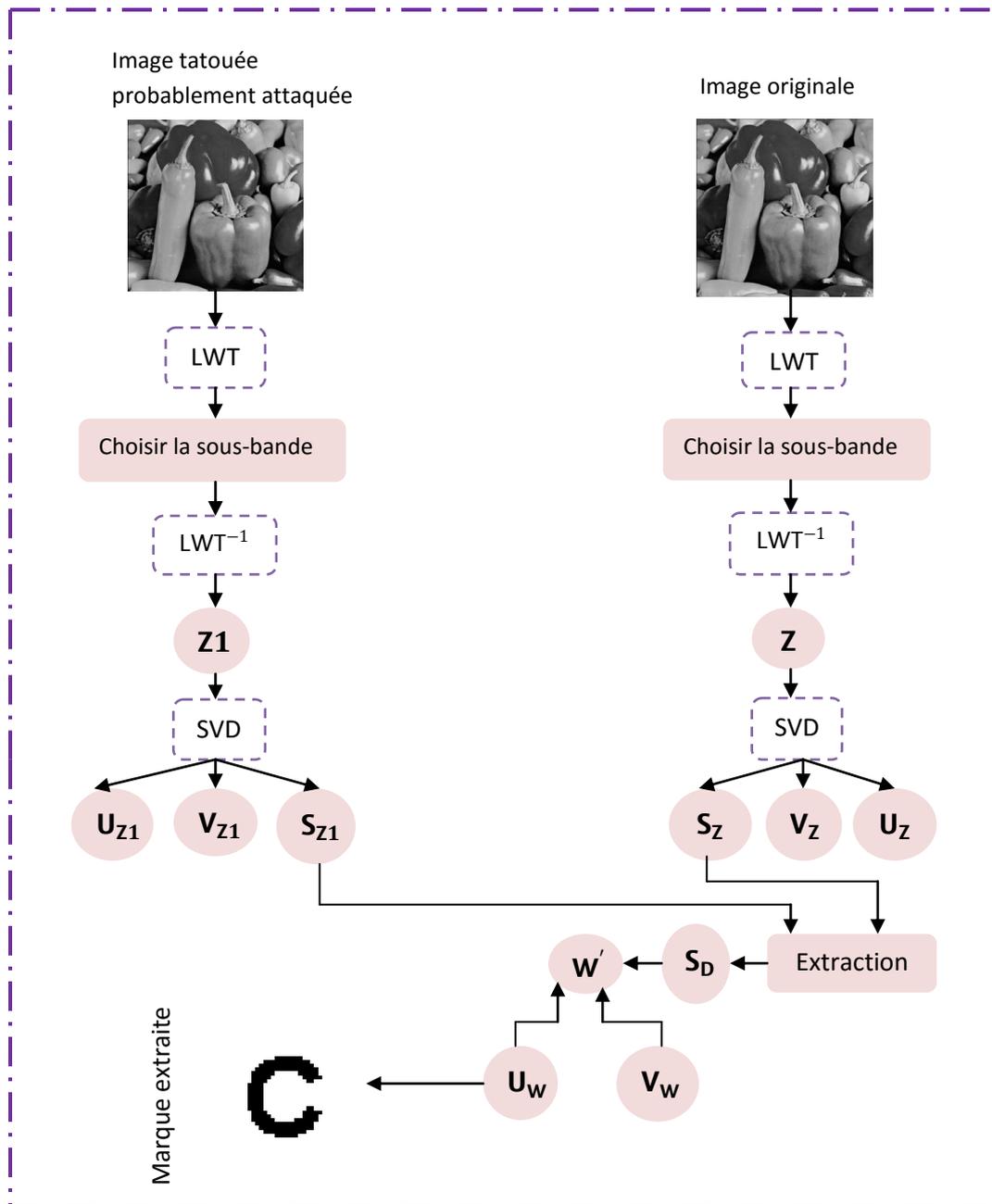


Figure (2.8) : Procédure d'extraction de l'algorithme de tatouage numérique proposé basé sur la SVD et la LWT [11].

- Extraire la marque représenté par la matrice \hat{W} par l'équation suivante :

$$\hat{W} = \mathbf{U}_W \cdot \mathbf{S}_D \cdot \mathbf{V}_W^T \quad (2.25)$$

- Calculer les mesures objectives entre la marque originale et la marque extraite.

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié et présenté plusieurs algorithmes de tatouage numérique basés sur la décomposition en valeurs singulières SVD. Tous ces algorithmes comportent deux procédures : une procédure d'insertion de la marque et une autre pour l'extraction de la marque. Nous avons aussi décrit et présenté l'algorithme de tatouage numérique basé sur la décomposition en valeurs singulières SVD et la transformée en ondelettes discrètes basé sur le schéma de lifting LWT.

3 CHAPITRE3 Optimisation par l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles

3.1 Introduction

Un problème d'optimisation est défini par un ensemble de variables, d'une fonction objective et un ensemble de contraintes. L'espace d'état, appelé aussi domaine de recherche, est l'ensemble des différentes variables du problème. Cet espace est en général fini, puisque les méthodes opèrent dans des espaces bornés pour des raisons pratiques et de temps de calcul. Dans le cas des problèmes à variables continues, une certaine granularité est définie. Les problèmes d'optimisation très complexes et difficiles à résoudre avec une fonction multimodale (comme l'illustre l'exemple de la figure (3.1), nécessitent l'utilisation d'algorithmes dit métaheuristiques (algorithmes génétiques, colonie de fourmis, colonie d'abeilles,...). On rappelle qu'une métaheuristique est définie comme un processus itératif qui guide une heuristique (recherche), en combinant intelligemment plusieurs concepts pour explorer et exploiter tout l'espace de recherche.

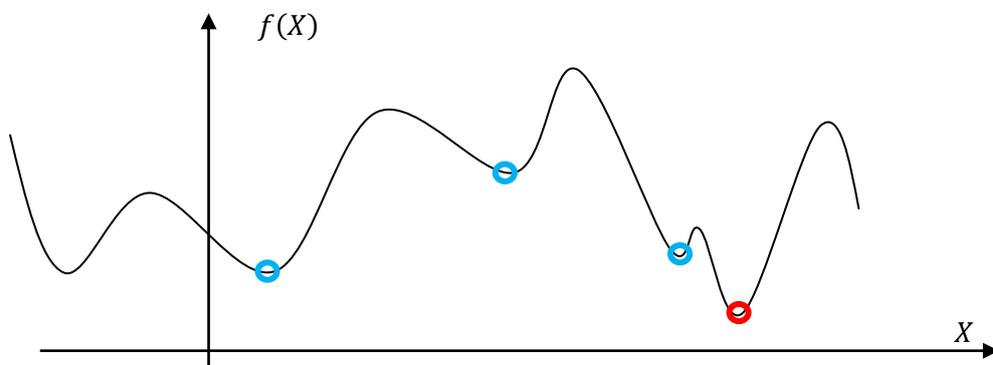


Figure 3.1 : Exemple d'une fonction objective multimodale à minimiser

La fonction objective à minimiser ou à maximiser, détermine le but à atteindre. Dans ce chapitre on s'intéresse à l'optimisation multi-objective en utilisant l'algorithme colonie d'abeilles artificielles. Cette approche sera utilisée pour améliorer la robustesse et l'imperceptibilité du tatouage numérique des images.

3.2 Classification des méthodes métaheuristiques

Le mot métaheuristique vient des mots grecs meta (au-delà) et heuriskein (trouver). Les métaheuristiques peuvent contenir des mécanismes qui permettent d'éviter la stagnation de la recherche et la capacité d'explorer efficacement l'espace de recherche. Cependant on distingue deux catégories:

a) les approches basées sur le parcours ou trajectoire

Ces algorithmes partent d'une solution initiale (obtenue de façon exacte, ou par tirage aléatoire) et s'en éloignent progressivement (itérativement), pour réaliser une trajectoire, un parcours progressif dans l'espace des solutions. Dans cette catégorie, on cite par exemple :

- le recuit simulé
- la méthode Tabou
- la recherche par voisinage variable.

b) les approches évolutives « population de solutions » :

Elles consistent à travailler avec un ensemble de solutions simultanément, que l'on fait évoluer graduellement. L'utilisation de plusieurs solutions simultanément permet naturellement d'améliorer l'exploration de l'espace des configurations. Dans cette seconde catégorie, on cite les algorithmes suivants :

- Les algorithmes génétiques.
- Les algorithmes par colonies de fourmis.
- L'optimisation par essaim particulaire (Particle Swarm Optimization).
- Les algorithmes d'abeilles artificielles (Bee Algorithm Optimization).

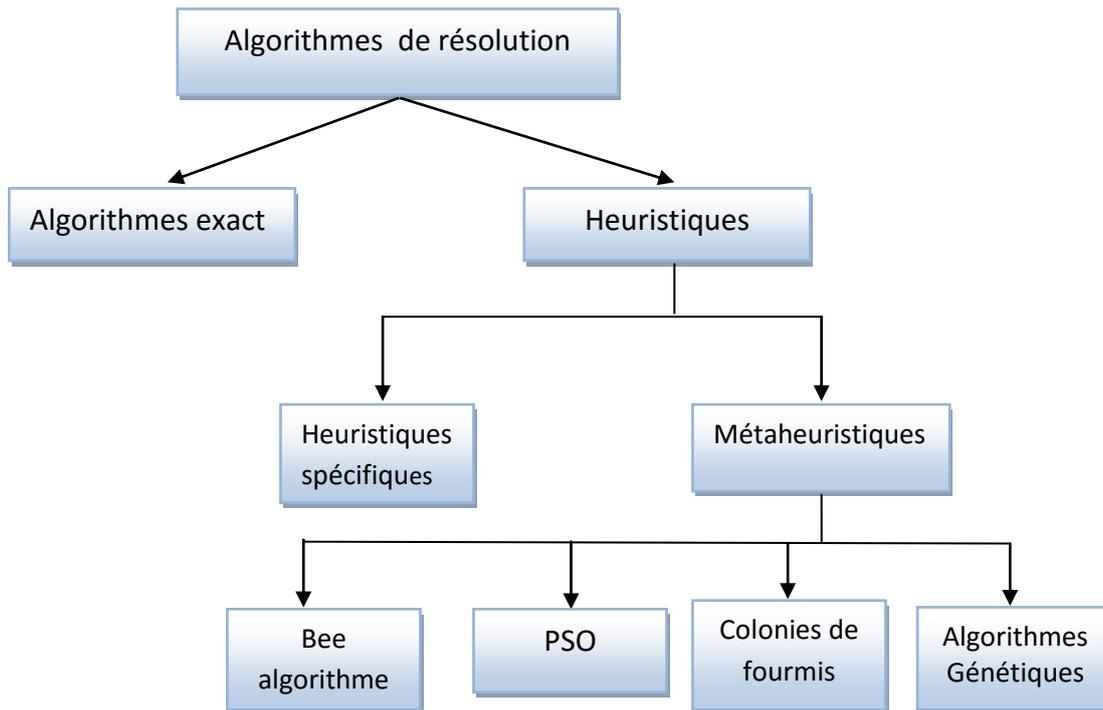


Figure 3.2 : Classification des méthodes d'optimisation

3.3 Optimisation par l'algorithme colonie d'abeilles artificielles

L'optimisation par colonie d'abeilles est une méthode très récente. Son principe est basé sur le comportement des abeilles réelles dans la nature. L'algorithme a été développé en 2005 par Dervis Karaboga.

Dans ce contexte, nous allons donner la structure d'une colonie d'abeille, puis une description du comportement des abeilles lors de la recherche de nourriture, enfin nous allons présenter l'algorithme d'optimisation colonie d'abeilles artificielles.

3.3.1 Les abeilles en nature

Les abeilles possèdent des propriétés assez différentes de celles des autres espèces d'insectes. Elles vivent en colonies, en construisant leurs nids dans des troncs d'arbres ou d'autres espaces clos similaires [12]. Généralement, une colonie d'abeilles contient une femelle reproductrice appelée reine, quelques centaines de mâles connus sous le nom de faux-bourdon, et de 10.000 à 80.000 femelles stériles qu'on appelle « ouvrières ». Après

accouplement avec plusieurs faux-bourdon, la reine reproduit beaucoup de jeunes abeilles appelées les couvées.

- **La Reine** : Dans une colonie d'abeilles, il y a une seule reine qui est la femelle reproductrice avec l'espérance de vie entre 3 et 5 ans. Son rôle principal est la reproduction.
- **Le male (faux-bourdon)** : Au sein de la famille des Apidés, se trouvent plusieurs genres, et notamment les bourdons, qu'il ne faut pas confondre avec les faux-bourdons, les mâles de l'abeille domestique. Les faux-bourdons représentent les mâles, variant entre 300 et 3000 dans une ruche. Ce dernier a une espérance de vie de 90 jours. Après l'accouplement, qui a lieu en vol, le male meurt rapidement [13].
- **Ouvrières** : Les ouvrières sont les abeilles femelles mais elles ne sont pas reproductrices, elles vivent de 4 à 9 mois dans une saison froide et leur nombre arrive jusqu'à 30.000 dans une colonie (ruche). Cependant, en été, leur durée de vie est de 6 semaines et leur nombre atteint jusqu'à 80.000. L'ouvrière est responsable de la défense de la ruche utilisant sa piqûre barbelée. En conséquence, elle meurt après. L'ouvrière assure les activités habituelles de la colonie d'abeilles telles que l'emballage de pollen, éventer les abeilles, porter l'eau, déplacement des œufs, s'occuper de la reine, nourrir les bourdons, et construction du nid d'abeilles [14].
- **Couvées** : Les jeunes abeilles sont nommées les couvées. Elles sont nées après que la reine pond un œuf fécondé. L'œuf fécondé donne naissance à une abeille ou à une reine en fonction des soins et de la nourriture apportés aux larves. Peu de larves femelles sont choisies pour être des futures reines. Les œufs non fertilisés donnent naissance aux couvées.

Les abeilles adultes (âgées de 20 à 40 jours) deviennent habituellement des butineuses. Les abeilles butineuses jouent en général l'un des trois rôles suivants : butineuses actives, butineuses éclaireuses et butineuses inactives.

- 1) **Les Abeilles inactives (spectatrices)** : Si l'abeille n'a aucune connaissance des sources de nourritures dans l'espace de recherche alors elle est dite inactive.

- 2) **Les Abeilles actives** : Quand l'abeille trouve et exploite une source elle devient active, elle mémorise la position de la source, charge une partie du nectar et revient à la ruche où elle le décharge, ensuite elle effectue une danse appelée «danse frétillante», pour partager avec les autres abeilles la position de la source en question.
- 3) **Les Abeilles éclaireuses (scout)** : Ce type d'abeille utilise l'historique de leur mémoire pour trouver les meilleures sources de nourriture.

3.3.2 La recherche de nourriture chez les abeilles

Les scientifiques ont effectué beaucoup de recherches pour déterminer comment l'ordre est maintenu dans la ruche où vivent des dizaines de milliers d'abeilles. Un grand nombre d'études académiques ont été aussi effectuées à cette fin. Un éminent expert et professeur à l'Université de Munich, le zoologiste autrichien Karl Von Frisch, a consacré un livre de 350 pages à la communication des abeilles, "The dance language and orientation of bees" (Le langage de la danse et l'orientation des abeilles) [12].

3.3.3 Exploration des sources de nourriture

L'abeille qui cherche à manger, appelée « éclaireuse », se trouve devant une tâche formidable. Elle quitte la ruche, cherche dans de vastes zones et vole de longues distances, elle doit donc reconnaître les bonnes sources de nourriture et avant que les abeilles butineuses retournent à la ruche, elle doit enregistrer sa position par rapport à la ruche et dépose une odeur spéciale sur leur source de nourriture. Une fois qu'une source de nourriture a été localisée et marquée, elle doit retourner à la ruche pour informer les autres ouvrières de sa découverte. Pour cela, elle doit utiliser des informations sur la direction de la ruche même si, pour arriver où elle est, elle fait tout un circuit. Après, elle doit communiquer aux autres ouvrières la direction et la distance de la source de nourriture par rapport à la ruche, et elle doit donner certaines indications sur sa qualité. Ceci doit être fait de la façon la plus économique possible. Elle doit donc attirer l'attention des autres ouvrières, qui peuvent déjà être occupées à autre chose ou avoir reçu des messages d'autres abeilles.

3.3.4 Méthode de communication chez les abeilles

Karl Von Frisch a construit une ruche avec une paroi en verre par laquelle il pouvait observer le comportement des abeilles à l'intérieur. Il remarqua que lors du retour des abeilles ouvrières à la ruche, elles exécutent la danse. Si une seule abeille l'exécute, ce n'est pas toute la ruche qui passe à l'action. Premièrement, un groupe d'éclaireuses quitte la ruche. Si, à son retour, ce groupe exécute aussi la danse, alors un groupe plus important d'abeilles se dirigera vers l'objectif. Meilleure est la source de nourriture qu'elles trouvent, plus longtemps dure la danse et plus grand sera le nombre d'abeilles qui les suivent. De cette façon, l'attention des butineurs est toujours fixée sur la source la plus productive.

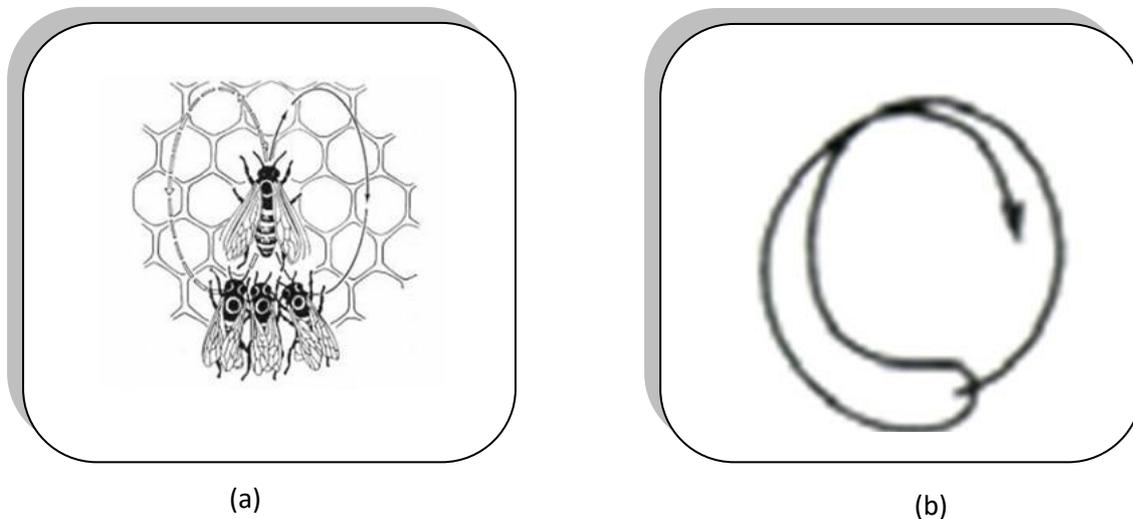


Figure (3.3) : (a) Danse en huit. (b) Danse en rond.

Si la source de nourriture qu'elles trouvent est très riche, la danse que les abeilles exécutent est très enthousiaste. Si la source est à proximité, elles décrivent son emplacement en exécutant la "danse en rond" illustrée à droite. Pour les sources de nourriture plus éloignées, elles exécutent la danse en huit illustrée à gauche, avec des mouvements frétilants [12].

Dans la danse frétilante, l'abeille tourne alternativement d'un côté et de l'autre effectuant un demi-tour circulaire qui la ramène au point de départ. Les ouvrières suivent la danseuse au cours de ses déplacements, et la touchent des antennes. Cette danse est très riche en information, en particulier, elle donne aux abeilles observatrices deux indications essentielles : la quantité de nourriture, la distance à parcourir et la direction à suivre [14].

Concernant la distance, plusieurs paramètres sont utilisés simultanément, le plus important est le tempo de la danse, c'est-à-dire le nombre de tours complets effectués par la danseuse par unité de temps. Les mouvements de l'abeille sont d'autant plus durables que la source est riche (quantité de nourriture). En ce qui concerne la direction, elle est donnée par rapport à l'azimut solaire (en plan horizontal), la position angulaire de la source est indiquée par l'angle que fait la partie frétilante avec la verticale du rayon comme l'indique la figure (3.2). Dans le cas où la source de nourriture trouvée serait improductive, les abeilles dansent tout de même, mais elles le font à contrecœur et pendant une plus brève durée. Cela se reflète aussi sur les autres abeilles dans la ruche, les abeilles qui se rassemblent autour de la danseuse se dispersent rapidement et une nouvelle équipe quitte la ruche à la recherche de nourriture [12].

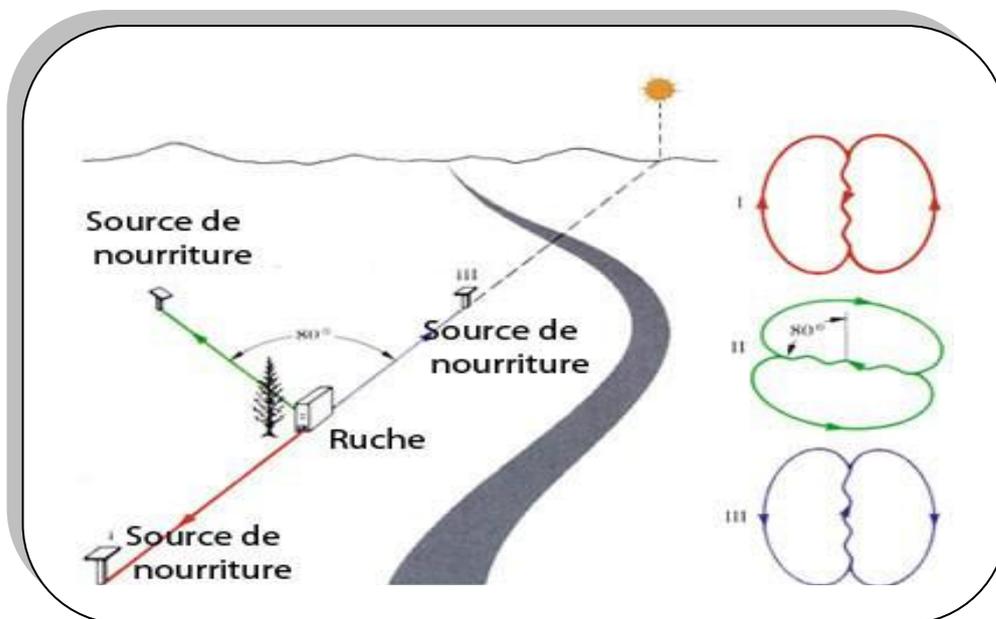


Figure (3.4) : L'indice de la direction.

Si la source de nourriture se trouve exactement dans la direction du soleil, ou dans la direction opposée, les frétillements dans la danse seront verticaux sur le rayon.

Si la source de nourriture est 80 degrés à gauche du soleil, cela est indiqué en faisant la trajectoire du frétillement de la danse à un angle correspondant de 80 degrés à gauche de la verticale.

Si l'abeille suit une direction vers le haut durant son fréttement, elle signale que la source de nourriture se trouve dans la direction vers le soleil. Et si elle se dirige droit en bas, cela signifie que la source se trouve dans la direction exactement opposée de celle du soleil.

3.3.5 Optimisation naturelle : les directions fournies par les abeilles

Comme il a été déjà mentionné, peu après avoir regardé l'abeille danseuse, les autres ouvrières quittent la ruche et se dirigent vers l'objectif. Cependant, les abeilles sont confrontées à un problème important : l'angle que la danseuse a fourni à ses sœurs est basé sur le soleil. Cependant, le soleil n'est pas fixe dans le ciel, mais il change de position de 1 degré toutes les 4 minutes. Si une abeille suivait la ligne d'origine, elle ne serait jamais capable de localiser son objectif à cause du changement de position du soleil. Pour 4 minutes, donc il y a une marge d'erreur de 1 degré, laquelle atteindra des dimensions impossibles à corriger au cours d'un long voyage. En réalité, cela ne se produit jamais. Depuis maintenant des millions d'années, les abeilles ont compris les directions qui leur sont fournies par leurs sœurs, malgré le mouvement du soleil et le changement des angles. Les abeilles n'éprouvent aucune difficulté à trouver des sources de nourriture, ce qui indique qu'elles ne font aucune erreur en calculant l'angle par rapport au soleil.

Pour exprimer cela en termes mathématiques, les abeilles calculent que le soleil se déplace de 1 degré à chaque 4 minutes. En conséquence, elles sont capables de se rappeler de l'emplacement exact de la source de nourriture et de le "décrire" aux autres abeilles. Les autres abeilles calculent l'angle suivant la position modifiée du soleil, comprennent les directions données et localisent la source de nourriture en question.

3.4 Algorithme colonie d'abeilles artificielles

Les algorithmes d'optimisation basés sur les insectes sociaux et l'intelligence d'essaim ont prouvé leur puissance et leur efficacité dans beaucoup d'applications. En se basant sur les comportements des abeilles, les scientifiques ont développé plusieurs algorithmes puissants.

L'algorithme ACA (l'Algorithme de Colonie d'Abeilles Artificielles), divise la colonie d'abeilles en trois groupes d'abeilles [15].

- Les abeilles actives (ouvrières).

- Les observatrices.
- Les exploratrices.

Une source de nourriture est trouvée par une seule abeille active, en d'autres termes, le nombre d'abeilles actives est égal au nombre de sources de nourriture autour de la ruche. Quand cette source de nourriture est épuisée par les abeilles actives, les abeilles observatrices deviennent des abeilles exploratrices.

Dans l'algorithme ACAA, chaque cycle de la recherche consiste en trois étapes :

1. L'envoi des abeilles ouvrières sur les sources de nourriture.
2. mesurer les quantités du nectar apporté par ces abeilles.
3. le partage d'informations des abeilles ouvrières et la sélection des sources de nourriture par les abeilles observatrices.

Les principales étapes de l'algorithme sont données ci-dessous :

- 1) Initialiser
- 2) Répéter
- 3) Placer les abeilles ouvrières sur les sources de nourriture et mémoriser.
- 4) Placer les abeilles observatrices sur les sources de nourriture et mémoriser.
- 5) Envoyer des exploratrices dans la zone de recherche pour la découverte de nouvelles sources de nourriture.
- 6) Jusqu'à ce que (Arrêt).

À l'étape d'initialisation, un ensemble de positions de sources de nourritures est choisie au hasard, et les informations sur le montant de nectar de ces sources sont partagées avec les abeilles en attente sur la piste de danse au sein de la ruche.

À la seconde étape, après avoir partagé les informations, chaque abeille ouvrière va à la zone de la source de nourriture visitée par elle-même au cycle précédent et choisit en suite, une nouvelle source de nourriture par des moyens d'information visuelle dans le voisinage de cette source.

À la troisième étape, une abeille observatrice choisie une zone de source de nourriture en fonction de l'information (sur le nectar) diffusée par les abeilles employées (l'aire de la danse).

Quand la quantité de nectar d'une source augmente, la probabilité avec laquelle cette source est choisie par une abeille observatrice augmente aussi.

Par conséquent, selon la danse des abeilles ouvrières portant plus de nectar, recrute plus d'observatrices pour des zones de sources de nourriture avec un plus grand montant de nectar. Après l'arrivée à la zone sélectionnée, elles choisissent une nouvelle source de nourriture dans le voisinage de celle en mémoire en fonction de l'information visuelle.

Appliquant tout cela sur l'algorithme ACAA. Les positions des sources de nourritures représentent des solutions possibles du problème d'optimisation et la quantité de nectar d'une source correspond à sa qualité (fitness). Le nombre d'abeilles actives et observatrices est égale au nombre de solutions initiales.

L'algorithme génère (SN : nombre de sources) solutions distribuées aléatoirement dans l'espace de recherche. Chaque solution x_i ($i = 1, 2, \dots, SN$) de dimension d , représente le nombre de paramètres d'optimisation. Après initialisation, les solutions sont soumises à un processus itératif ($C = 1, 2, \dots, C_{max}$) de recherche des abeilles actives, observatrices et exploratrices [16].

Dans l'algorithme ACA, la position d'une source de nourriture X_i représente une solution possible au problème d'optimisation, et la quantité de nectar dans une source de nourriture correspond au fitness $fit(X_i)$ de la solution correspondante X_i .

Une abeille observatrice choisit une source de nourriture en fonction de la valeur de probabilité associée avec cette source de nourriture, p_i calculée par l'expression suivante [17]:

$$p_i = \frac{fit(X_i)}{\sum_{n=1}^{SN} fit(X_n)} \quad (3.1)$$

- $fit(X_i)$: la valeur du fitness de la solution i évaluée par son abeille employés
- SN : le nombre des sources de nourriture (solutions).

Une abeille ouvrière modifie la solution possible en fonction de la quantité de nectar (valeur de fitness) de la nouvelle source qu'est généré en utilisant l'équation suivante [16]:

$$V_{ij} = X_{ij} + rand * (X_{ij} - X_{kj}) \quad (3.2)$$

- $k \in \{1, 2, \dots, BN\}; k \neq i$; (BN=SN: nombre des abeilles employés).
- $j \in \{1, 2, \dots, D\}$; (D : nombre des paramètres a optimisées).
- $rand \in [-1, 1]$: chiffre aléatoire entre -1 et 1.

Ceci correspond à une recherche au voisinage des sources sélectionnées. Les opérations sont répétées pendant un certain nombre de d'itérations C_{max} définit préalablement. Si une position ne peut être améliorée après un certain nombre d'itérations appelé (limite) elle est abandonnée, et celle-ci est remplacé par une nouvelle source x_i^j calculer par la formule :

$$x_i = x_j^{min} + (x_j^{max} - x_j^{min}) * rand \quad (3.3)$$

C'est l'opération d'exploration de l'espace de recherche afin d'éviter la stagnation de l'algorithme de recherche.

Donc les paramètres de contrôle de l'algorithme ACA sont :

- SN : Nombre de source de nourriture.
- Limite : Limite d'abondant.
- Nombre d'abeille active = SN.
- Nombre d'abeille observatrice = SN.
- Nombre d'abeille exploratrices = 1.
- C_{max} : Nombre d'itérations.

x_j^{max} et x_j^{min} : Les bornes de l'espace de recherche.

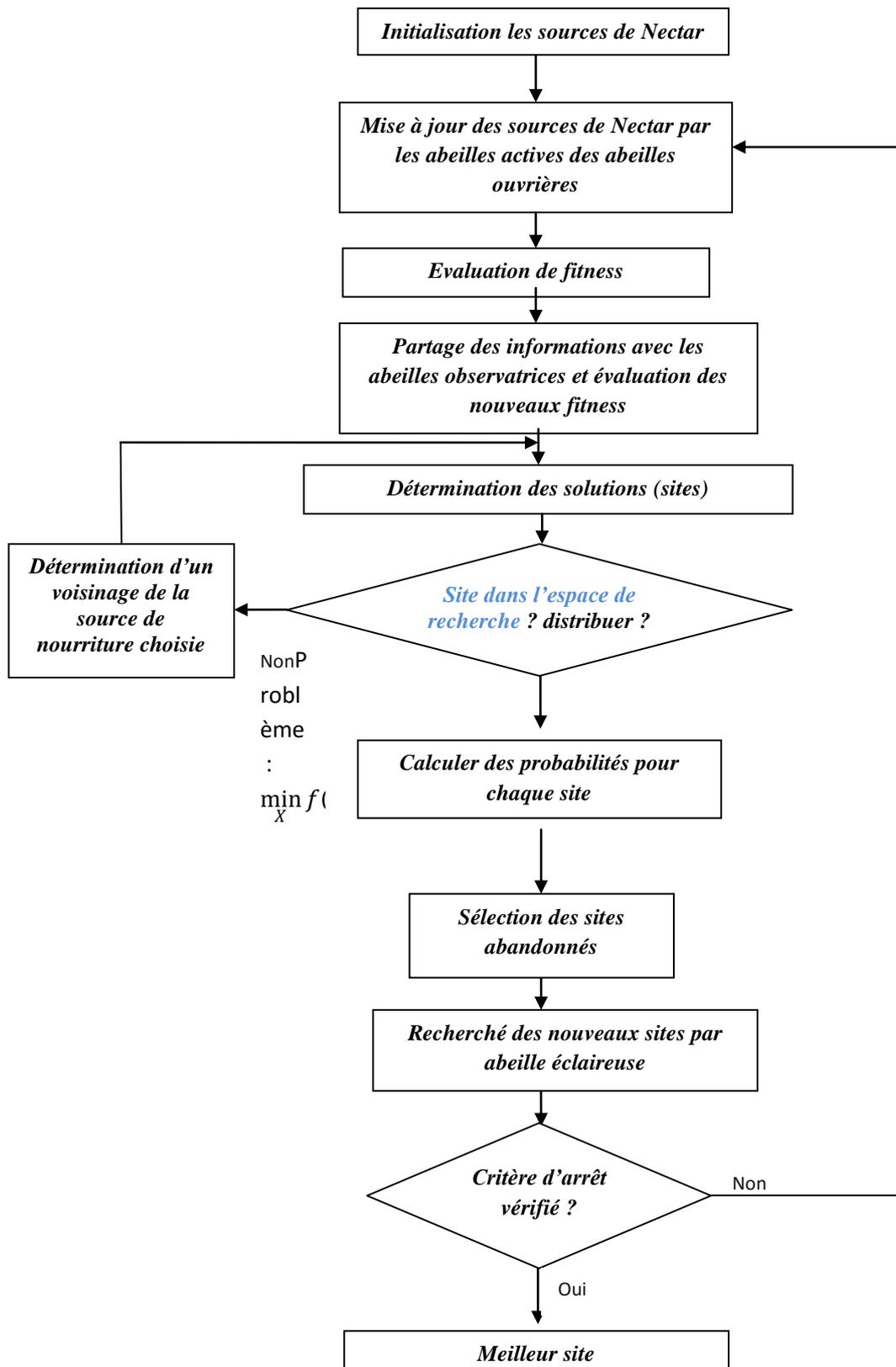


Figure (3.5) : organigramme du modèle de l'algorithme de ACAA

3.5 Optimisation multi-objective des paramètres d'insertion par l'algorithme ACAA.

Les algorithmes de tatouage numérique sont classifiés selon la règle d'insertion de la marque en deux catégories : multiplicatif et substitutif.

L'insertion selon la règle additive se fait selon l'équation suivante :

$$I_W = I_0 + \alpha \cdot W \quad (3.4)$$

Selon la règle additive, l'image tatouée I_W est obtenue en ajoutant la matrice W multipliée par un facteur d'insertion α à la matrice I_0 . Un petit facteur d'insertion assure une grande qualité visuelle de l'image tatouée alors que la robustesse de la marque est plus faible. D'autre part un facteur d'insertion élevé assure une forte robustesse mais cause une plus grande dégradation de la qualité de l'image tatouée.

Cox et al [18] affirment qu'un facteur d'insertion scalaire unique peut ne pas être applicable pour modifier toutes les valeurs de l'image originale I_0 par ce que les composantes spectrales peuvent présenter une tolérance différente à la modification, pour cette raison, ils suggèrent d'utiliser des facteurs d'insertion scalaire multiples au lieu d'un facteur d'insertion scalaire unique : le paramètre d'insertion α est alors remplacé par un vecteur. Par conséquent, les facteurs scalaires multiples devraient être utilisés pour s'adapter aux différentes composantes spectrales afin d'obtenir le meilleur compromis entre l'imperceptibilité et la robustesse. Cependant, la détermination des valeurs optimales des facteurs scalaire multiples est un problème très difficile.

Pour résoudre ce problème, on utilisera une méthode d'optimisation pour la recherche des valeurs optimales des facteurs scalaires multiples sur une large gamme de solutions possibles. Cette méthode c'est l'optimisation multi-objective par l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ACAA).

Dans cette section, on explique comment l'algorithme de colonie d'abeille artificielle peut être utilisé dans l'algorithme de tatouage numérique des images, le processus de l'algorithme ABC est présenté comme suit:

- ❖ Définir le nombre d'itérations, la taille de la population (nombre des sources de nectar), l'intervalle des paramètres à optimiser.
- ❖ Générer la population de manière aléatoire.
- ❖ Evaluer la quantité de chaque source, avec les différentes mesures objectives entre l'image originale et l'image tatouée (PSNR) et entre la marque originale W et la marque extraite \widehat{W} après une attaque (coefficient de corrélation normalisée (NC))
- ❖ Evaluer la fonction multi-objective fitness par la relation suivante :

$$Fitness(i) = PSNR + 100 * \sum_l NC_j(W, \widehat{W}) \quad (3.5)$$

Avec i c'est le nombre des individus. l Nombre d'attaques

- ❖ Calculer la probabilité de choisir une source de nourriture par l'équation suivante :

$$P_i = \frac{0.9 * fitness_i}{\max_i(fitness_i)} + 0.1 \quad (3.6)$$

- ❖ Sélectionner une source de nourriture et ensuite modifier sa position avec

$$m_{ij}(t+1) = x_{kj} + y(x_{ij}(t) - x_{kj}(t)) \quad (3.7)$$

Avec $y \in [0, 1]$, un nombre aléatoire.

Tel que m_{ij} est la i^{eme} position de l'abeille observatrice, t est le nombre d'itérations, x_{ij} est l'abeille utilisée choisie aléatoirement, « j » représente la dimension du vecteur de solution qui produit une série de variables aléatoires dans la gamme $[-1; 1]$; où $k \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ et $j \in \{1, 2, 3, \dots, D\}$ sont choisis aléatoirement, « D » est le nombre de paramètre à optimiser, « k » est aussi choisi aléatoirement mais doit être différent de l'indice « i ».

- ❖ Déplacer les scouts : si les valeurs de fitness des abeilles employeuses ne sont pas améliorées par un nombre d'itérations prédéterminé, appelé « max_cycle », ces sources de nourriture sont abandonnées, et l'abeille trouvée dans cet emplacement passera aléatoirement pour explorer d'autres nouveaux emplacements. (Abeilles employeuses deviennent des Scouts).

- ❖ Mettre à jour la meilleure source de nourriture trouvée jusqu'ici : apprendre la meilleure valeur de Fitness et la position, qui sont trouvées par les abeilles, et les mémoriser.
- ❖ Critère d'arrêt : vérifier le processus de calcul jusqu'à ce que le nombre d'itérations atteigne la valeur maximale prédéfinie ou qu'une solution de la fonction objective acceptable soit trouvée.

3.6 Conclusion

La méthode d'optimisation par colonie d'abeilles est l'une des récentes méthodes d'optimisation qui peut être appliquée à de nombreux problèmes d'optimisation. Le principe consiste à générer une population initiale de manière aléatoire, et procéder à une recherche stochastique en se basant principalement sur deux opérations. Recherche au voisinage des sources sélectionnées, et une recherche d'exploration en introduisant de nouvelles sources après un certain nombre de tentatives d'amélioration.

Ce processus permet d'un côté une accélération de la recherche et d'un autre une meilleure exploration de l'espace de recherche.

Notre intérêt dans le prochain chapitre, réside à appliquer cette méthode sur le tatouage numérique des images, et d'analyser les résultats nous permettant de faire un compromis entre robustesse et l'imperceptibilité.

4 CHAPITRE4

Résultats

Simulation et

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des tests d'imperceptibilité et de robustesse d'un algorithme de tatouage numérique basé sur la transformée en ondelettes à base du schéma de *lifting* (LWT) et la décomposition en valeurs singulières (SVD). L'optimisation des facteurs multiples permettant le contrôle de l'intensité de l'insertion de la marque est réalisée avec l'algorithme colonie d'abeilles artificielles (ACAA). Les résultats de la robustesse et d'imperceptibilité sont ainsi examinés.

4.2 Imperceptibilité et robustesse avec un facteur d'insertion scalaire $\alpha = 2.4$

Pour examiner les résultats d'optimisation sur les tests d'imperceptibilité de l'algorithme de tatouage numérique des images basé sur la transformée en ondelettes à base du schéma de *lifting* (LWT) et la décomposition en valeurs singulières (SVD), différentes images à niveaux de gris de taille 256×256 pixels sont utilisées. Chacune est considérée comme une image originale. Ces images sont : « Woman », « Boat », « village », « Man », « Baboon ». L'image marque utilisée est la lettre B, qu'est une image binaire de taille 32×32 pixels.

Afin de vérifier l'imperceptibilité, l'image tatouée (après insertion de la marque) est comparée à l'image originale (avant insertion de la marque) avec une mesure du PSNR, du coefficient de corrélation normalisé, et le MSE.

Pour tester la robustesse de cet algorithme de tatouage proposé, différentes attaques sur les images tatouées sont simulées comme par exemple :

- Attaque par bruit Sel & poivre avec une densité égale à 0.2, salt & peppers noise, dénotée par **SP**.
- Attaque par filtrage gaussien (3×3) de paramètre 0.4, (gaussianfilter), dénotée par **GF**.
- Attaque par égalisation d'histogramme, (histogram equalisation), dénotée par **HE**.
- Attaque par compression JPEG avec un facteur 60 dénotée par **CM**.
- Attaque par mise à l'échelle 256 → 512 → 256, (scaling), dénotée par **SC**.



(a) Woman



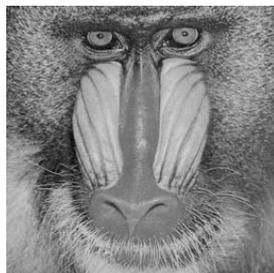
(b) Boat



(c) village



(d) Man



(e) Baboon



(f) lettre B

Figure (4.1) : Images originales utilisées et image marque «lettre B ».

La figure (4.2), montre l'image tatouée « Woman » de taille 256×256 . Le rapport signal sur bruit PSNR et la similarité structurelle SSIM et l'erreur quadratique moyenne MSE entre l'image originale et l'image tatouée sont PSNR=60.4522dB, SSIM=0.9999854, MSE=0.0585.



Figure (4.2) : Image « Woman » tatouée.

La figure (4.3) montre l'image « Boat » tatouée de taille 256×256 . Le rapport signal sur bruit PSNR et la similarité structurelle SSIM et l'erreur quadratique moyenne MSE entre l'image originale et l'image tatouée sont PSNR=60.1720 dB, SSIM=0.9999850, MSE=0.0625.



Figure (4.3) : Image « Boat » tatouée.

La figure (4.4) montre l'image « village » tatouée de taille 256×256 . Le rapport signal sur bruit PSNR et la similarité structurelle SSIM et l'erreur quadratique moyenne MSE entre l'image originale et l'image tatouée sont PSNR=59.6604dB, SSIM=0.9999851, MSE=0.0703.



Figure (4.4) : Image « village » tatouée.

La figure (4.5) montre l'image « Man » tatouée de taille 256×256 . Le rapport signal sur bruit PSNR et la similarité structurelle SSIM et l'erreur quadratique moyenne MSE entre l'image originale et l'image tatouée sont PSNR=59.5644dB, SSIM de 0.9999887, MSE de 0.0825.



Figure (4.5) : Image « Man » tatouée.

La figure (4.6) montre l'image « Baboon » tatouée de taille 256×256 . Le rapport signal sur bruit PSNR et la similarité structurelle SSIM et l'erreur quadratique moyenne MSE entre l'image originale et l'image tatouée sont PSNR=59.8453dB, SSIM=0.9999767, MSE=0.0673.

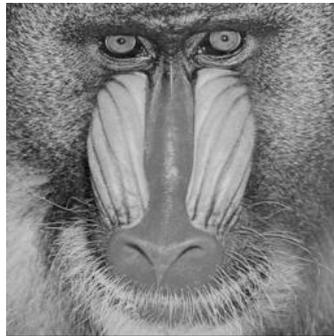


Figure (4.6) : Image « Baboon » tatouée.

Le tableau 4.1 donne les résultats d'imperceptibilité obtenus selon trois mesures objectives : le rapport signal sur bruit PSNR, la similarité structurelle SSIM, l'erreur quadratique moyenne MSE. Ces trois mesures sont calculées entre l'image originale et l'image tatouée. D'après les valeurs du PSNR et surtout du SSIM représentées au tableau 4.1 on remarque que le rapport signal sur bruit et la similarité structurelle sont élevées.

Tableau 4.1 : résultats d'imperceptibilité en utilisant un facteur scalaire unique.

Image	I_0 et I_W		
	PSNR	SSIM	MSE
Woman	60.4522 dB	0.9999854	0.0585
Boat	60.1720 dB	0.9999850	0.0625
village	59.6604 dB	0.9999851	0.0703
Man	59.5644 dB	0.9999887	0.0825
Baboon	59.8453 dB	0.9999767	0.0673

La figure (4.7), montre en (a) l'image «Woman» tatouée attaquée de taille 256×256 par un bruit « sel & poivre » avec une densité égale à 0.2, et en (b) l'image marque extraite « lettre B » de taille 32×32 . Le Coefficient de corrélation normalisée NC, et le taux de bits correctes BCR entre la marque extraite et la marque originale sont $NC = 0.8913$ et $BCR = 84.1796\%$.



Figure (4.7) : (a) image «Woman» tatouée attaquée, (b) image marque « lettre B » extraite.

La figure (4.8), montre en (a) l'image «Boat» tatouée de taille 256×256 attaquée par un filtrage gaussien (3×3) de paramètre 0.4, et en (b) l'image marque extraite « lettre B » de taille 32×32 . Le Coefficient de corrélation normalisée NC, et le taux de bits correctes BCR entre la marque extraite et la marque originale sont $NC = 0.7614$ et $BCR = 67.6757\%$



Figure (4.8) : (a) image «Boat» tatouée attaquée, (b) image marque « lettre B » extraite.

La figure (4.9) montre en (a) l'image «village» tatouée attaquée de taille 256×256 après une égalisation d'histogramme, et en (b) l'image marque extraite « lettre B » de taille 32×32 . Le Coefficient de corrélation normalisée NC, et le taux de bits correctes BCR entre la marque extraite et la marque originale sont $NC = 0.9561$ et $BCR = 93.3593 \%$.



Figure (4.9) : (a) image « village » tatouée attaquée, (b) image marque « lettre B » extraite.

La figure (4.10) montre en (a) l'image «Man» de taille 256×256 tatouée attaquée par une compression JPEG avec un facteur 60, et en (b) la marque extraite « lettre B » de taille 32×32 . Le Coefficient de corrélation normalisée NC, et le taux de bits correctes BCR entre la marque extraite et la marque originale sont $NC = 0.9289$ et $BCR = 89.5507\%$.

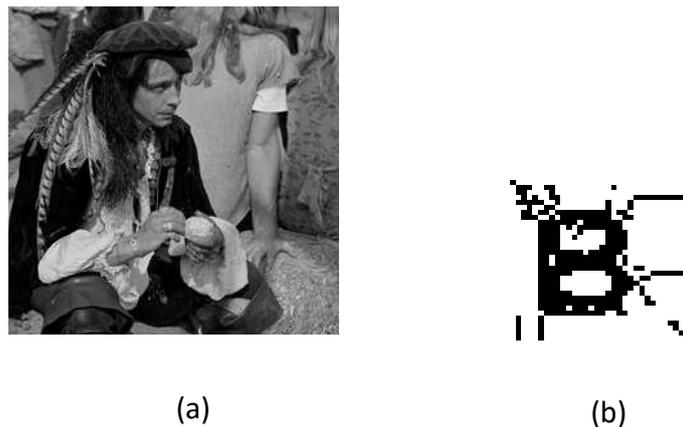
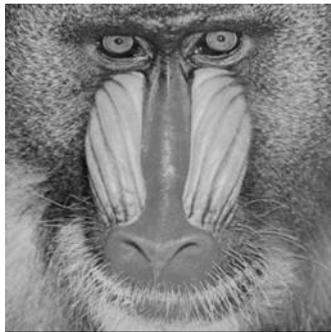
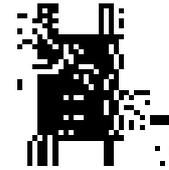


Figure (4.10) : (a) image « Man » tatouée attaquée, (b) image marque « lettre B » extraite.

La figure (4.11) montre en (a) l'image «Baboon» tatouée de taille 256×256 attaquée par une mise à l'échelle $256 \rightarrow 512 \rightarrow 25$, et en(b) la marque extraite « lettre B » de taille 32×32 . Le Coefficient de corrélation normalisée NC, et le taux de bits correctes BCR entre la marque extraite et la marque originale sont $NC = 0.8376$ et $BCR = 77.0507\%$.



(a)



(b)

Figure (4.11) : (a) image « Baboon » tatouée attaquée, (b) image marque « lettre B » extraite.

Le tableau 4.2 donne un récapitulatif des résultats de la robustesse obtenus selon deux mesures objectives : la corrélation normalisée NC, et le rapport des bits corrects BCR. Ces deux mesures sont calculées entre la marque originale et la marque extraite lorsque chaque image tatouée a été attaquée par une seule attaque. D'après les valeurs de la corrélation normalisée NC ($0.7614 \leq NC \leq 0.9561$) et le rapport des bits corrects BCR ($67.6757\% \leq BCR \leq 93.3593\%$), on peut déduire que notre algorithme résiste bien à ces attaques.

Tableau 4.2 : résultats de la robustesse en utilisant un facteur scalaire unique.

Image	Attaque	NC et BCR (%)
Woman	SP	0.8913 84.1796
Boat	GF	0.7614 67.6757
village	HE	0.9561 93.3593
Man	CM	0.9289 89.5507
Baboon	SC	0.8376 77.0507

4.3 Simulations et résultats d'optimisation multi-objective des paramètres d'insertion par l'algorithme de colonie d'abeilles artificielle

Dans cette partie, les facteurs d'insertion multiples sont optimisés par l'algorithme ACAA (algorithme colonie d'abeilles artificielles) en MATLAB. Les résultats de l'optimisation sont évalués en termes de l'imperceptibilité et de la robustesse avec les différentes mesures objectives (MSE, PSNR, SSIM, NC).

On utilise une seule image comme une image originale qui est image «village» de taille 256×256 pixels. L'image marque utilisée c'est « lettre A » de taille 32×32 pixels.

On utilise dans cette section quatre attaques qui sont l'égalisation d'histogramme, le filtre gaussien 3×3 , le bruit sel & poivre, la quantification des niveaux de gris.



Figure (4.12) : (a) image originale, (b) image marque

4.3.1 L'optimisation multi-objective par l'attaque d'égalisation d'histogramme

La figure (4.13) montre en (a) l'image tatouée « village » de taille 256×256 , et en (b) l'image tatouée attaquée par l'égalisation d'histogramme, et en (c) la marque extraite « lettre A » de taille 32×32 . Le rapport signal sur bruit et l'erreur quadratique moyenne et la similarité structurale entre l'image originale et l'image tatouée sont $PSNR=58.6914$ dB, $MSE=0.0879$, $SSIM=0.9999$. La corrélation normalisée entre la marque originale et la marque extraite égale à 0.9988 .



Figure (4.13) : (a) image tatouée, (b) image égalisée, (c) image marque extraite.

4.3.2 L'optimisation multi-objective par le filtre gaussien 3×3

La figure (4.14) montre en (a) l'image tatouée « village » de taille 256×256 , et en (b) l'image tatouée attaquée par le filtre gaussien 3×3 , et en (c) la marque extraite « lettre A » de taille 32×32 . Le rapport signal sur bruit et l'erreur quadratique moyenne et la similarité structurelle entre l'image originale et l'image tatouée sont PSNR=60.4523dB, MSE=0.0586, SSIM=0.9999. La corrélation normalisée entre la marque originale et la marque extraite égale à 0.9976.



Figure (4.14) : (a) image tatouée, (b) image filtrée, (c) image marque extraite.

4.3.3 L'optimisation multi-objective par le bruit sel & poivre de paramètre 0.05

La figure (4.15) montre en (a) l'image tatouée « village » de taille 256×256 , et en (b) l'image tatouée attaquée par le bruit sel & poivre de paramètre 0.05, et en (c) la marque extraite « lettre A » de taille 32×32 . Le rapport signal sur bruit et l'erreur quadratique moyenne et la similarité structurelle entre l'image originale et l'image tatouée sont PSNR=78.2338 dB, MSE=9.7656e-04, SSIM=1. La corrélation normalisée entre la marque originale et la marque extraite égale à 0.9935.



Figure (4.15) : (a) image tatouée, (b) image bruitée, (c) image marque extraite.

4.3.4 L'optimisation multi-objective par la quantification des niveaux de gris

La figure (4.16) montre en (a) l'image tatouée « village » de taille 256×256 , et en (b) l'image tatouée attaquée par la quantification des niveaux de gris, et en (c) la marque extraite « lettre A » de taille 32×32 . Le rapport signal sur bruit et l'erreur quadratique moyenne et la similarité structurelle entre l'image originale et l'image tatouée sont $PSNR=78.2338$ dB, $MSE=9.7656e-04$, $SSIM=1$. La corrélation normalisée entre la marque originale et la marque extraite égale à 0.9739.

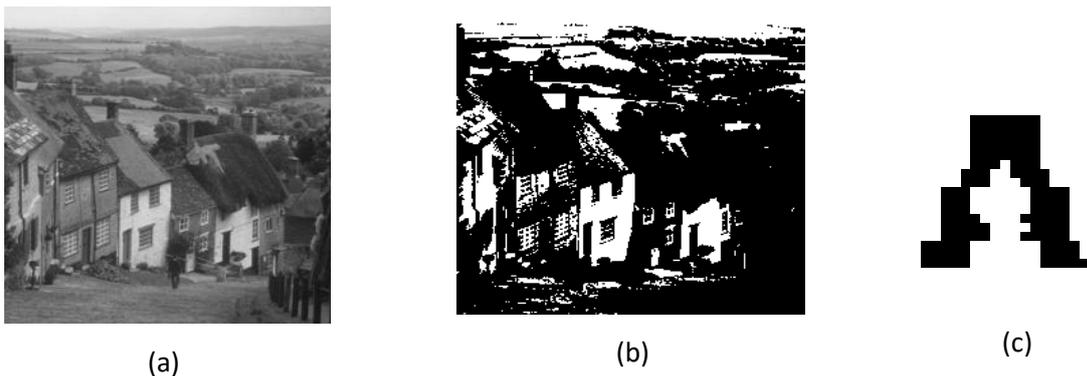


Figure (4.16) : (a) image tatouée, (b) image quantifiée, (c) image marque extraite.

Le tableau 4.3, donne les résultats d'imperceptibilité et la robustesse de l'algorithme de tatouage proposé en utilisant un facteur multiple optimisé par l'algorithme de ACAA. D'après les tests d'imperceptibilité on remarque que les valeurs d'un rapport signal sur bruit PSNR et la similarité structurelle SSIM et l'erreur quadratique moyenne MSE sont élevés.

D'après les résultats des tests de la robustesse illustrés au tableau 4.3 on remarque que la valeur de la corrélation normalisée minimale entre la marque originale et la marque extraite est égale à 0.9935. Cela signifie que l'algorithme proposé est très robuste face aux attaques suivantes : **HE, GF, SP, QNG**.

Tableau 4.3 : résultats des tests d'imperceptibilité et de la robustesse en utilisant un facteur scalaire multiple optimisé par ACAA.

Image	Attaque	W et \hat{W}	I_0 et I_W		
		NC	PSNR	SSIM	MSE
village	HE	0.9988	58.6914 dB	0.9999	0.0879
	GF	0.9976	60.4523dB	0.9999	0.0586
	SP	0.9935	78.2338 dB	1	9.7656e-04
	QNG	0.9739	78.2338 dB	1	9.7656e-04

4.3.5 L'optimisation multi-objective pour trois attaques simultanées

Dans cette section on utilise trois attaques en même temps dans l'optimisation multi-objective. Ces trois attaques sont :

- Attaque par égalisation d'histogramme, (histogramm equalisation), dénoté par **HE**.
- Attaque par filtre gaussien 3×3 , (gaussian filtre), dénoté par **GF**.
- Attaque par la quantification des niveaux de gris (1 bit), (gray value quantization), dénoté par **QNG**.

Le tableau 4.4 donne les résultats d'imperceptibilité et de la robustesse de l'algorithme proposé en utilisant des facteurs multiples optimisés par l'algorithme ACAA. On remarque que les valeurs de la corrélation normalisée, le rapport signal sur bruit et la similarité structurelle sont très élevés. Donc on peut dire que l'algorithme proposé est très robuste contre les attaques suivantes : **HE, FG, QNG**.

Tableau 4.4 : résultats des tests d'imperceptibilité et de la robustesse en utilisant trois attaques en même temps et un facteur scalaire multiple optimisé par ACAA.

	avant attaque $NC(W, \hat{W})$	Après attaque $NC(W, \hat{W})$	$NC(I, \hat{I})$	PSNR(dB)	SSIM	MSE
HE	1	0.9965	1	78.2338	1	9.765e-04
FG	1	0.9959				
QNG	1	0.9959				

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé un algorithme de tatouage efficace en termes d'imperceptibilité et de la robustesse. L'utilisation et optimisation des facteurs d'insertion multiples s'avère efficace et améliore significativement les résultats.

Conclusion générale

Le développement rapide des réseaux de communication a provoqué de nouveaux problèmes liés à la sécurité des documents ou des images échangés. La sécurisation des images stockées ou transmises, est généralement effectuée par des techniques de tatouage dont le développement est devenu un grand challenge ces dernières années.

Le projet que nous a été proposé, a pour objectif de tester la robustesse et l'imperceptibilité de la technique de tatouage basée sur la décomposition en valeur singulière et la transformée en ondelettes basée sur le schéma de lifting, avec une phase d'optimisation réalisée par l'algorithme colonie d'abeilles artificielles.

Les résultats de simulation d'imperceptibilité et de la robustesse et les mesures objectives effectuées sur les images tatouées soumises aux différentes attaques, montrent clairement une amélioration obtenue grâce à l'optimisation des facteurs d'insertion multiples.

Table des abréviations

DFT	Discrete Fourier Transform
DCT	Discrete Cosine Transform
DWT	Discrete Wavelet Transform
DHT	Discrete Hadamard Transform
MSE	Mean Square Error
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio
SSIM	Structural Similarity Index for measuring image quality
NC	Normalized Correlation
BCR	Bit Correct Ratio
HH	High High frequency band
HL	High Low frequency band
LH	Low High frequency band
LL	Low Low frequency band
LSB	Less Significant Bits
JPEG	Joint Photographic Experts Group
SVD	Singular Value Decomposition
LWT	Lifting Wavelet Transform
ABC	Algorithme Bee Colony
SP	Salt & peppers noise
GF	Gaussian filter
CM	JPEG compression
SC	Scaling
HE	Histogram equalisation
QNG	Gray value quantization
ACAA	Algorithme de Colonie d'Abeilles Artificielles

Bibliographie:

- [1] K. Tanaka, Y. Nakamura, and K. Matsui. Embedding secret information into dithered multilevel image. In *proc. 1990 IEEE Military Communication Conference*, pages 216-220, september 1990.
- [2] N. Komatsu et H. Tominaga : Authentication system using concealed image in telematics. *Memoires of the School of Science & Engineering, Waseda University*, (52) : 45-60, 1988.
- [3] X. Huang et B. Zhang : Statistically Robust Detection of Multiplicative Spread-Spectrum Watermarks. *Pattern Recognition Letters*, 25(15) :1769-1775, novembre 2004.
- [4] M. Ramkumar, A.N. Akansu et A.A. Alatan : A robust data hiding scheme for images using DFT. In *IEEE International Conference on Image Processing*, vol. 2, p. 211-215, Kobe, Japon, octobre 1999.
- [5] M. H. Hayes : The Reconstruction of a multidimensional sequence from the phase or magnitude of its Fourier transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, ASSP-30(2) :140-154, avril 1982.
- [6] F. Hartung et M. Kutter : Multimedia watermarking techniques. *Proceedings of the IEEE*, 87(7) :1079-1107, juillet 1992.
- [7] B.J. Falkowski et L.-S. Lim : Image watermarking using Hadamard transforms. *IEEE Electronics letters*, 36(3) : 211-213, février 2000.
- [8] V. ASLANTAS : An optimal robust digital image watermarking based on SVD using differential evolution algorithm. *Optics Communications*, 282(5) :769-777.
- [9] Y. JIE, Algorithm of Image Information Hiding Based on New Anti-Arnold transform and Blending in DCT Domain, Université NANJING, China.
- [10] HETATACHE KARIMA. " Développement d'algorithmes de tatouage d'images bases sur la SVD et les transformées discrete", Mémoire, Université FERHAT ABBAS-SETIF, 2014.

- [11] Khaled Loukhaoukha. « Tatouage numérique des images dans le domaine des ondelettes basé sur la décomposition en valeurs singulières et l'optimisation multi-objective », These PHD, Université LAVAL, 2010.
- [12] H. YAHYA, Book *"The Miracle of the honeybee"*, G. M. D. Cd., Ed., Okmeydani-Istanbul-Turkey. March 2007.
- [13] Harunyahya. <http://jlapetitlaurent.free.fr/abeille/><http://lerucherdulac.free.fr>.
- [14] Mezhoudi Houcem Edine, Résolution du problème d'affectation de fréquence dynamique en utilisant un algorithme basé sur le comportement des abeilles, 2010.
- [15] M. Surendra Prasad Babu: "Implementation of Artificial Bee Colony (ABC) Garlic Expert Advisory System.
- [16] Bonabeau E, Dorigo M, and Theraulaz G. Swarm Intelligence: "from Natural to Artificial Systems". Oxford University Press, New York, 1999.
- [17] Dervis Karaboga, Bahriye Basturk: "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm"
- [18] I. J. Cox, J. KILIAN, F. T. LEIGHTON et T. SHAMOON : Secure spread spectrum watermarking for multimedia. "IEEE Transactions on Image Processing, 6 (12) : 1673-1687, décembre 1997.