

---

# **CONTRIBUTION A LA NORME DE COMPRESSION JPEG 2000 PAR LE TATOUAGE LORS DU PROCESSUS DE COMPRESSION**

**Idy DIOP\* , A .DIOP, S M FARSSI, K TALL, S OUYA, Amacodou FAYE,  
k SYLLA, I DIOUM**

Laboratoire d'Imagerie Médicale et de BioInformatique (LIMBI)  
Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar  
Université Cheikh Anta DIOP, Sénégal

---

## **Abstract:**

The developments of Internet and more generally new communications admitted the company (society) to an era where the digital technology takes a more and more important place (square).

The interest which the general public carries (wears) in these new numeric (digital) supports results in particular from opportunities which offer computers to treat(handle) and to treat (manipulate) the numeric(digital) data. This new era rests (poses) of this fact of severe problems of storage, transmission and protection of copyright. It is then that we appeal in her (it) of the methods of compression and watermarking.

In this paper we proposed a new approach by combining (organizing) the JPEG compression 2000 and the watermarking by spreading of spectra.

The principle is based on the insertion of an information during the process of compression with the aim of the transmission in an environment.

The extraction will be made during the decompression and we are going to test the robustness of this method in front of the JPEG compression

## **Résumé:**

Les développements d'Internet et plus généralement des nouveaux moyens de communication ont fait entrer la société dans une ère où le numérique prend une place de plus en plus importante.

L'intérêt que le grand public porte à ces nouvelles techniques numériques provient notamment des facilités qu'offrent les ordinateurs à traiter et manipuler les données numériques. Cette nouvelle ère pose de ce fait de sérieux problèmes de stockage, de transmission et de protection de droits d'auteurs.

Une solution à cette problématique est l'utilisation des méthodes de compression et de tatouage.

Dans cet article nous proposons une nouvelle approche en combinant la compression JPEG 2000 et le tatouage par étalement de spectre.

Le principe du tatouage est basé sur l'insertion d'une information lors du processus de compression. Nous explorons dans ce travail l'insertion d'une marque (information) par l'étalement du spectre avant la transmission dans un environnement bruité.

L'extraction sera faite lors de la décompression et le système mis est robuste face la compression JPEG 2000.

---

Keywords: JPEG 2000, PSNR, watermarking, Wide spread spectrum watermarking.

Mots clés:compression JPEG 2000, tatouage, étalement de spectre, PSNR

---

## **I. INTRODUCTION**

La société actuelle produit un nombre croissant de données qui doivent être traitées, transmises et / ou stockées. Celles-ci sont principalement du son, des images, des vidéos ou des textes et proviennent de différents secteurs tels que la physique, la médecine, la biologie, l'industrie, la culture, le tourisme ou la finance.

Le tatouage se propose de dissimuler au sein d'un document un message, tout en laissant le document marqué exploitable. Mais il y ajoute une notion de robustesse : la transmission du message doit être robuste aux modifications du média qui le véhicule.

## **II. LE PRINCIPE DU TATOUAGE NUMERIQUE**

Le tatouage [20]numérique est l'une des applications les plus prometteuses de la stéganographie [1]. Mais, avec ce nouveau concept, il ne s'agit plus de cacher une marque dans un document mais de le marquer d'une

---

\*Auteur correspondant : email : [idydiop@yahoo.fr](mailto:idydiop@yahoo.fr)

façon indélébile. Le document peut être de diverses natures : texte, image, son, vidéo. Par la suite et dans le cadre de notre travail, on va s'intéresser essentiellement au type d'image.[27]

En général, un schéma de tatouage se découpe en deux étapes fondamentales : l'insertion et la détection de la signature.

La marque à insérer doit satisfaire essentiellement trois contraintes qui sont la capacité, l'invisibilité et la robustesse [15].

### III. LE TATOUAGE PAR ÉTALEMENT DE SPECTRE [15]

#### III.1 Insertion par étalement de spectre

Nous considérons un message à transmettre noté  $b \in \mathbb{R}^n$  modélisé par les variables aléatoires  $B_j$ , (avec  $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ) et d'énergie  $E[B_j^2] = 1$ . Il peut être obtenu par codage direct des informations que l'on souhaite transmettre ou par la sortie d'un système de correction d'erreur. Le signal hôte est noté par  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ . [25] La modélisation sous la forme de lois normales indépendantes pour chacun des échantillons de  $x$  permet la prise en compte des mixtures de gaussiennes pour les coefficients issus d'une transformée en ondelette. On suppose donc le signal hôte comme la réalisation d'un ensemble de variables aléatoires indépendantes  $X_i = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ , avec  $X_i \sim N(0, \sigma_{X_i}^2)$ . On a  $n$  très inférieur à  $m$  souvent, car généralement la taille du message à transmettre dans le schéma de tatouage est tout au plus de quelques centaines de bits, alors que le signal hôte se compose souvent de plus de cent milles échantillons (un signal hôte composé de la luminance d'une image monochrome de taille 512x512 donne  $m > 2,5 \times 10^5$ ).[25]

Pour l'insertion de  $n$  symboles binaires dans  $m$  échantillons, l'étalement de spectre utilise un ensemble de porteuses, regroupées au sein d'une matrice  $G$  de dimension  $n \times m$  et telle que  $G \in \mathbb{R}^{n \times m}$ , dont chacune des éléments est d'espérance nulle et de moyenne  $E[G(i, j)^2] = 1$ . Cette matrice est construite pseudo-aléatoirement en utilisant une clef. La clef est connue lors de l'insertion et de l'extraction, mais reste secrète pour les autres protagonistes de la chaîne de communication (les éventuelles attaques que peuvent subir l'image tatouée lors de sa transmission).[26]

On définit le signal de marque  $w$  par  $\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$ ,

$$w_i = \frac{\sigma w_i}{\sqrt{n}} \sum_{j=i}^n G(i, j) x_{bj}$$

et le signal marqué est :

$$y = x + w$$

La pondération  $\frac{\sigma w_i}{\sqrt{n}}$  permet d'adapter l'énergie de la marque échantillon par échantillon. Par le théorème de la limite centrale, comme chaque élément  $w_i$  est obtenu par la somme des  $n$  valeurs pseudo-aléatoires (avec  $n$  suffisamment grand), la marque peut être vue comme la réalisation d'un ensemble de variables aléatoires  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_m\}$  suivant une loi normale  $w_i \sim N(0, \sigma w_i^2)$ . Et comme les signaux  $x$  et  $w$  sont indépendants,  $y$  est une réalisation de  $Y$  avec  $Y_i \sim N(0, \sigma_{Y_i}^2 = \sigma_{X_i}^2 + \sigma w_i^2)$ . [17].[15]

#### III.2 Extraction du message

L'extraction se fait généralement par corrélation entre les porteuses et le signal reçu. Le critère du maximum à postériori (MAP) permet d'estimer les symboles  $b_j$  introduit par le tatouage. La valeur du  $j^{\text{ème}}$  bit est donnée par :

$$\tilde{b}_j = \arg \max_b \{P_j(b)\}$$

avec  $P_j(b) = \Pr(B_j = b | Y' = y')$  [30]

où  $Y'$  est l'ensemble des  $m$  variables aléatoires modélisant le signal  $y'$  et  $B_j$  est la variable aléatoire modélisant le  $j^{\text{ème}}$  bit inséré.

On donc

$$P_j(b) \times \Pr(Y' = y') = \Pr(B_j = b, Y' = y') \quad (\text{formule de Bayes})$$

$$= \Pr(Y' = y' | B_j = b) \times \Pr(B_j = b)$$

Or le signal  $y'$  est parfaitement connu à la réception, donc  $\Pr(Y' = y')$  est une constante. De plus, comme  $\Pr(B_j = b) = 1/2$ , alors :

$$P_j(b) \propto \Pr(Y' = y' | B_j = b).$$

Les points marqués étant indépendants entre eux, on peut alors écrire

$$P_j(b) \propto \prod_{i=1}^m \Pr(Y_i' = y_i' | B_j = b)$$

$$\propto \prod_{i=1}^m \Pr\left(Y_i' - \beta_i \frac{\sigma_{wi}}{\sqrt{n}} G(i, j) x B_j = y_i' - \beta_i \frac{\sigma_{wi}}{\sqrt{n}} G(i, j) x b \mid B_j = b\right)$$

Puisque le conditionnement de cette probabilité est indépendant du reste, on peut donc écrire :

$$P_j(b) \propto \prod_{i=1}^m \Pr\left(Y_i' - \beta_i \frac{\sigma_{wi}}{\sqrt{n}} G(i, j) x B_j = y_i' - \beta_i \frac{\sigma_{wi}}{\sqrt{n}} G(i, j) x b\right)$$

Or puisqu'on sait que  $Y_i' \sim N(0, \beta_i^2 (\sigma_{xi}^2 + \sigma_{wi}^2) + \sigma_{zi}^2)$ , alors le produit de distributions gaussiennes de forme :

$$Y_i' - \beta_i \frac{\sigma_{wi}}{\sqrt{n}} G(i, j) x B_j \sim N(0, \sigma_i^2) []$$

$$\text{Avec } \sigma_i^2 = \beta_i^2 (\sigma_{xi}^2 + \left(\frac{n-1}{n}\right) \sigma_{wi}^2) + \sigma_{zi}^2$$

Donc la probabilité  $P_j(b)$  devient [28]:

$$P_j(b) \propto \prod_{i=1}^m \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp\left(-\frac{(y_i' - \beta_i \frac{\sigma_{wi}}{\sqrt{n}} G(i, j) x b)^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

La probabilité  $P_j(b)$  est donc proportionnelle à  $\exp\left(-\frac{f(b)}{2}\right)$  où

$$f(b) = \sum_{i=1}^m \frac{(y_i' - \beta_i \frac{\sigma_{wi}}{\sqrt{n}} G(i, j) x b)^2}{\sigma_i^2}.$$

En développant  $f(b)$ , on trouve finalement :  $f(b) = \frac{(b - \tilde{b}_j)^2}{\sigma_{bj}^2} + \text{cte}$

Où cte ne dépend pas de  $b$  et on a :

$$\sigma_{bj}^2 = \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i^2 \sigma_{wi}^2}{n \times \sigma_i^2} \text{ et } \tilde{b}_j = \sigma_{bj}^2 \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i \frac{\sigma_{wi}}{\sqrt{n}} G(i, j) x y_i'}{\sigma_i^2}$$

Or, on avait au paravent

$$\tilde{b}_j = \arg \max_b \{P_j(b)\}$$

$$= \arg \min_b \{f(b)\}$$

$$\alpha \hat{b}_j$$

L'expression  $\hat{b}_j$  est l'estimateur optimal au sens du MAP. Sa performance est donc mesurable en terme de rapport signal-à-bruit du canal de tatouage, qui s'avère être un canal gaussien[25] :

$$\frac{Eb}{No} = E [\hat{b}_j]^2 / \sigma_{b_j}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \frac{(\beta_i \sigma_{wi})^2}{\sigma_i^2}$$

Au numérateur, on retrouve l'énergie de la marque pondérée par le facteur d'échelle de l'attaque, alors qu'au dénominateur, nous avons les différents bruits intervenant lors de la transmission du message  $\sigma_i^2 = \beta_i^2 (\sigma_{xi}^2 + (\frac{n-1}{n}) \sigma_{wi}^2) + \sigma_{zi}^2$  (le bruit du signal hôte, le bruit gaussien de l'attaque et enfin le bruit des autres symboles).

Le rapport signal-à-bruit nous permet de calculer la capacité du canal et la probabilité d'erreur. On la probabilité d'erreur par bit qui est définie par :

$$P_{eb} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left[ \sqrt{\frac{Eb}{2No}} \right] \text{ et la capacité du canal est définie par : } C = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{Eb}{No} \right] [29].$$

Pour minimiser la probabilité d'erreur, on maximise le rapport signal-à-bruit  $\frac{Eb}{No}$ . L'estimateur est donc un produit de corrélation pondérée entre le vecteur porteur du symbole à transmettre et le signal  $y'$  [21]

#### IV. PRINCIPE DE LA DEMARCHE

Habituellement le tatouage et la compression d'images sont deux opérations indépendantes dans les système de communication.

L'idée dans ce travail c'est de faire l'insertion ( respectivement l'extraction) de la marque lors du processus de la compression ( respectivement la décompression) JPEG 2000[23] comme illustré ci dessous.

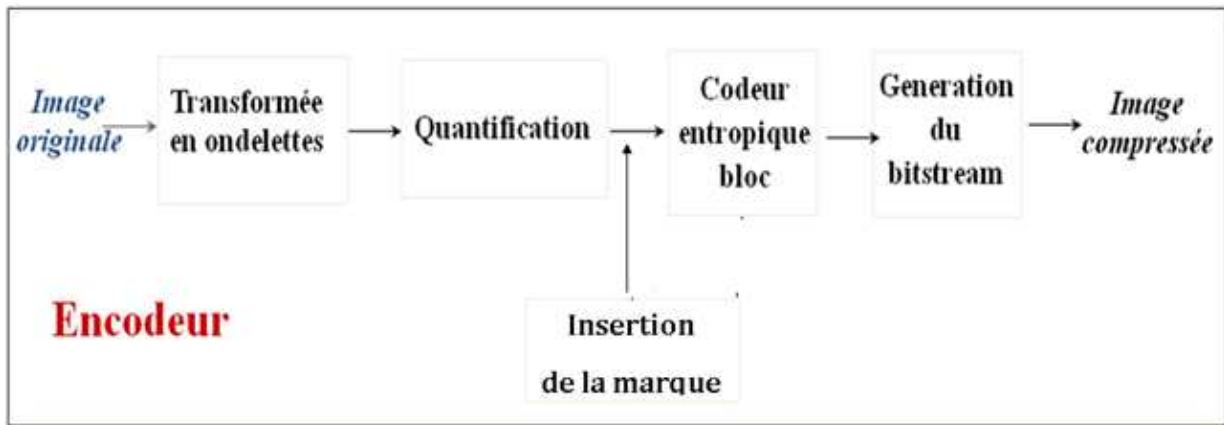


Figure1: Schéma de l'étape de l'insertion de la marque

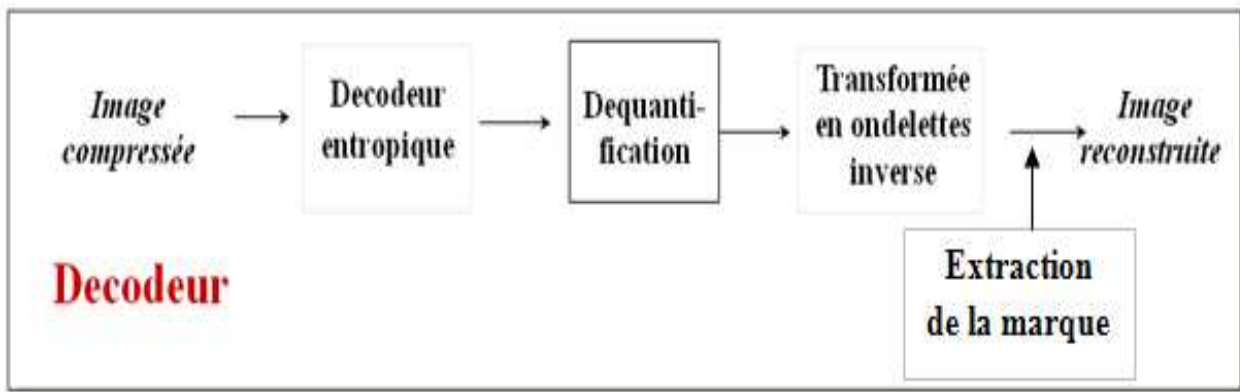


Figure 2 : Schéma de l'étape de l'extraction de la marque

## V. OUTILS D'ÉVALUATION

### a. La corrélation

La corrélation est un facteur capital pour identifier la signature insérée. En fait, cette signature appartient à une banque de clefs, de même nature, aptes d'être considérées comme signature. C'est grâce à la corrélation entre chacune de ces signatures et celle extraite qu'on arrive à identifier la marque originale.

$$\text{Cor}(A, B) = \langle A, B \rangle = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}}$$

La signature qui a la plus grande corrélation avec la signature extraite est soupçonnée comme la marque du propriétaire [9].

### b. Le PSNR : Peak Signal Noise Ratio

Le PSNR est une fonction du MSE. Il permet de déterminer l'imperceptibilité de la signature. En d'autre terme, il évalue la dégradation en db de l'image originale provoquée par l'insertion de la marque, et éventuellement par d'autres attaques.

Le PSNR est défini comme suit :

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} (x_{\text{max}}^2 / \text{MSE})$$

$$= 10 \log_{10} (255^2_{\text{max}} / \text{MSE})$$

## VI. PRESENTATION DES RESULTATS ET ANALYSES

Lors de ce test sur les images fixes nous avons utilisé le tatouage additif où le signal ajouté n'est pas corrélé au signal hôte. On fait d'abord la transformation en ondelette c'est-à-dire la compression et on fait le tatouage en ajoutant le bruit. Nous avons testé la robustesse de notre schéma face à une attaque comme la compression JPEG 2000.

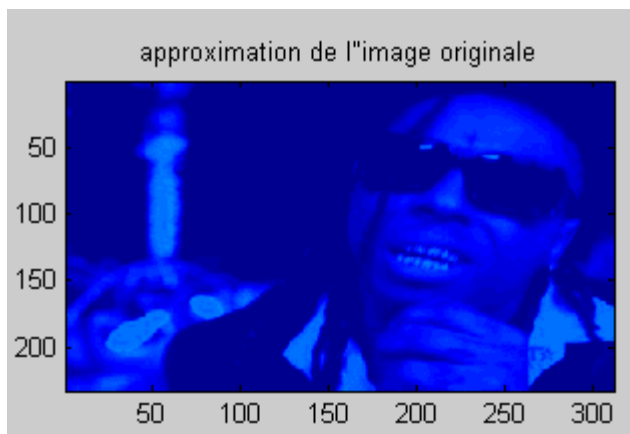


Figure 3: Image originale

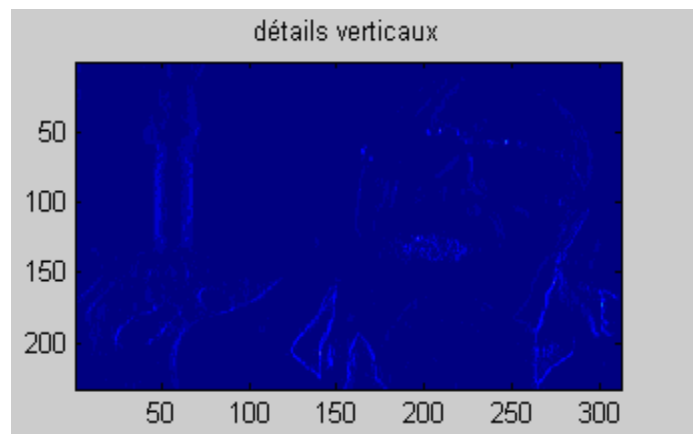
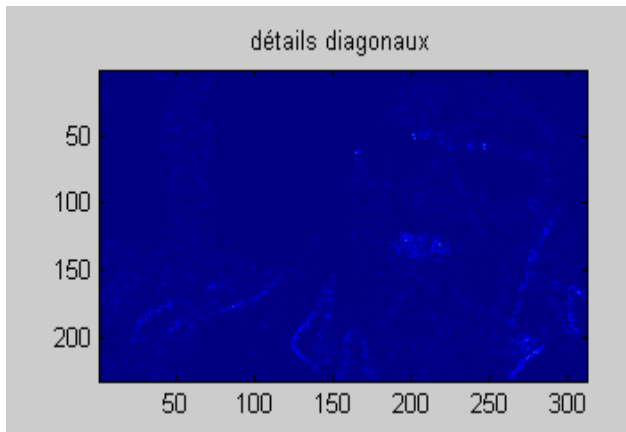
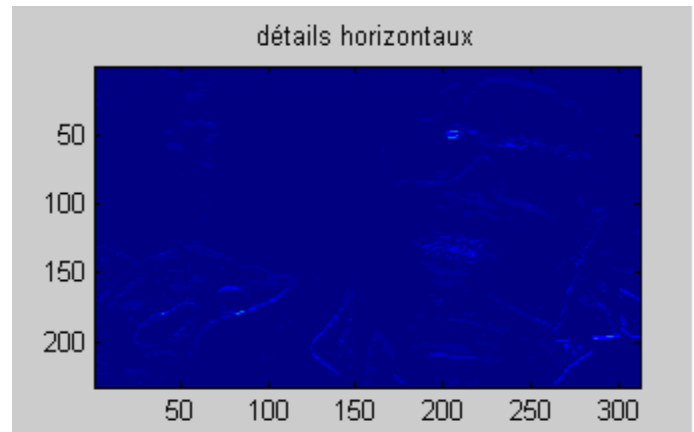


Figure 4: Représentation des détails verticaux

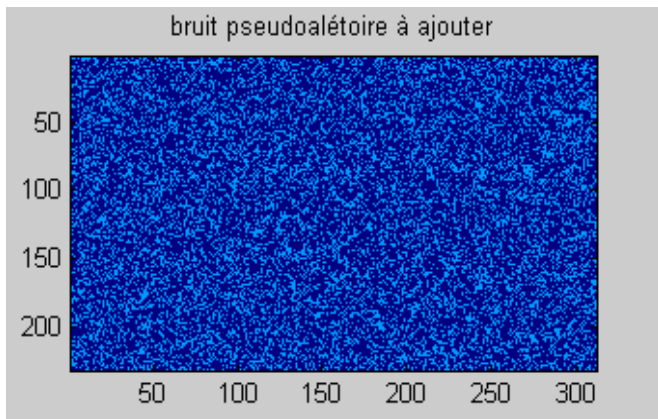


**Figure 5:** Représentation des détails diagonaux

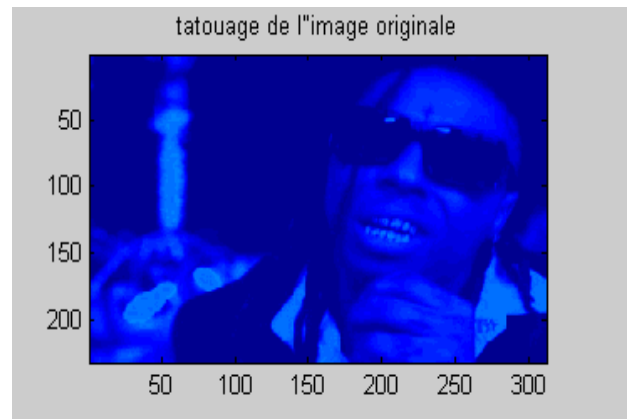


**Figure 6:** Représentation des détails horizontaux

Dans un premier temps nous faisons l'approximation de l'image originale dans sa globalité puis les détails horizontaux, verticaux et diagonaux.

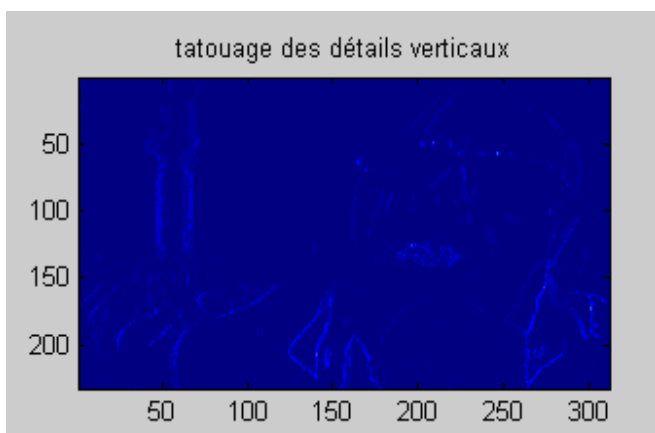


**Figure 7:** Représentation du bruit à ajouter

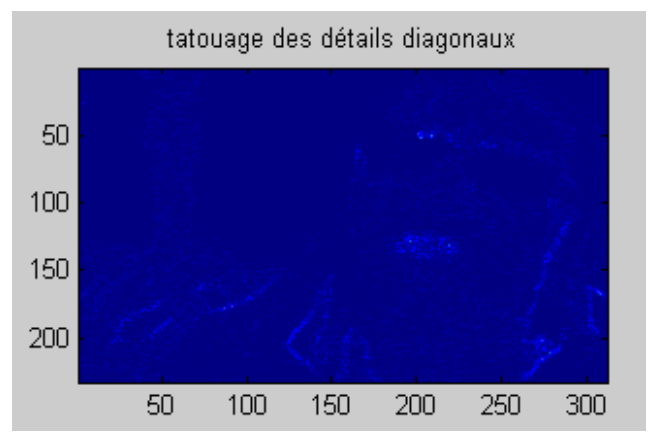


**Figure 8:** Tatouage de l'image originale

Pour évaluer les performances de notre approche, nous avons procédé à une étude comparative en deux étapes. La première est une étude préliminaire qui consiste à comparer l'image originale et l'image tatouée. Les figures 1 et 8 montrent respectivement l'image originale et l'image tatouée. Nous remarquons que le système visuel humain ne distingue pas la différence engendrée par le marquage.



**Figure 9:** Tatouage des détails horizontaux



**Figure 10:** Tatouage des détails diagonaux

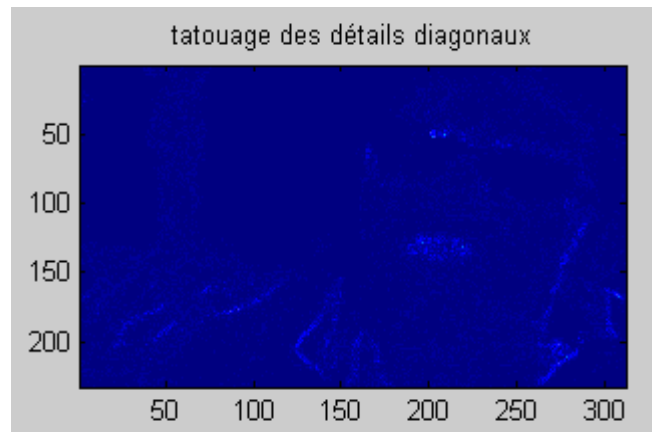


Figure 11: Tatouage des détails verticaux

Le tatouage [9] s'effectue avec l'ajout du bruit pseudo aléatoire. La marque n'est pas visible à l'œil nu et l'impression du rapport ne permet pas d'avoir une résolution suffisante pour pouvoir juger pleinement de la dégradation des images. Nous avons pris comme attaque la compression JPEG 2000[10]

#### Evaluation de la qualité

Pour évaluer la qualité, on peut mesurer la distorsion par le rapport Erreur Quadratique Moyenne (EQM). L'erreur quadratique moyenne notée EQM permet de mesurer de façon objective la dégradation entre une image originale et une image tatouée de coordonnées (n,m) et de dimensions M,N.

**Tableau :** valeur du PSNR pour différents taux de compression pour l'image tatouée lors de la compression JPEG 2000

| Taux de compression | 50      | 100     | 150     | 200     |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| PSNR JPEG2000       | 44.2114 | 40.0012 | 38.2104 | 36.8543 |

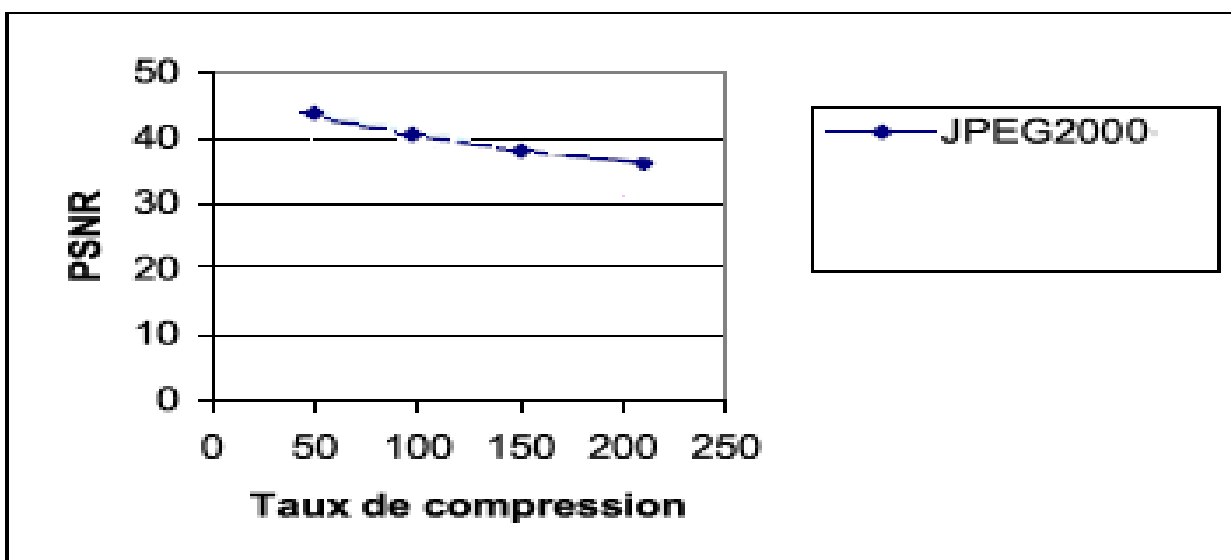


Figure 12: Courbe de variation du PSNR en fonction du taux de compression de l' image tatouée

---

Comme toute manipulation, le tatouage engendre une dégradation de l'image. Cette dégradation doit être minimisée afin d'assurer l'imperceptibilité de la marque insérée. Cette caractéristique est importante pour le tatouage. Elle constitue un critère d'évaluation de performance de la méthode de tatouage. La dégradation de l'image causée par le tatouage est le résultat de l'insertion des éléments la signature dans cette image. Ainsi la dégradation de l'image tatouée par rapport à l'image originale n'est pas visible à l'œil nu, c'est le calcul du PSNR qui permet de la matérialiser.

En effet, nous retrouvons toujours le même PSNR car les tests sont effectués dans les mêmes conditions, afin d'avoir une analyse objective. De plus, nous faisons varier le taux de compression pour évaluer notre approche. En augmentant le taux de compression nous observons une faible diminution de la valeur du PSNR ce qui signifie que notre méthode est assez robuste à une attaque comme la compression [7].

Il est à noter que le taux de compression ne doit pas dépasser un certain seuil. Au-delà de ce seuil on observe une dégradation de l'image.

## VII. CONCLUSION

Plusieurs recherches ont été effectuées sur la compression d'image notamment JPEG 2000 pour les images fixes. Ils constituent des étapes importantes dans le procédé de codage de l'image numérique en général. Le problème majeur concernant la compression est le rapport taux de compression et perte de donnée.

La marque bruit utilisée dans ce type de tatouage permet d'adapter un tatouage numérique, sous forme de spectre étalé, aux images, avec pour but de minimiser la distorsion visuelle. Les premiers résultats ont clairement démontré que la marque satisfait à la théorie, et permet l'insertion d'un tatouage.

Nous avons aussi noté une robustesse du tatouage par étalement de spectre en mesurant le PSNR pour différent degré de compression.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] **R.C.Gonzales Et P.Wintz**

'*Digital Image Processing*', New York - Edition Addison Wesley 1992.pp 416-429

[2] **R.C.Gonzales Et P.Wintz**

'*Digital Image Processing*', New York - Edition Addison Wesley 1992.pp 211-289

[3] **Park D., Park J., Han J.H.,**

"*Image Indexing using Color Histogram in the CIELUV Color Space*".Proc. of the 5th Japan-Korea Joint Workshop on Computer Vision, pp. 126-132, January 1999.

[4] **Mouhamed Abdoulaye Niane** Réalisation d'un système d'aide au diagnostic des mammographies

Mémoire d'ingénieur de conception en informatique. Soutenu à l'ESP 2007-2008

[5] **Franck DAVOINE.** *Compression d'images par fractales basée sur la triangulation de Delaunay.* Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Décembre 1995.

[6] **A.D'hardancourt**

'*Fou du multimédia.*' Œuvre paru le 26 Février 1999 aux éditions Sybex 1999.

[7] **Mohammed BENABDELLAH**

'*Outils de compression et de crypto compression : applications aux images fixes et vidéo*'

Thèse soutenue le 20 Juin 2007 à Université Mohammed V – Agdal, Faculté des Sciences, Rabat, (Maroc).

[8] **Ahmed Ben Atitalah**

'*Etude et Implantation d'Algorithmes de Compression d'Images dans un Environnement Mixte Matériel et Logiciel*'

Thèse soutenue le 11 Juillet 2007 à l'Université Bordeaux 1

[9] **T.Furon, J.Joss, S.LeSquin**

Some theoretical aspects of watermarking detection



---

*Proc. Security, steganography and watermarking of multimedia content*, E. Delp and P.W. Wong, San Jose, CA, USA, January, 2006.

[10] **F.Cayre,C.Fontaine,T.Furon**

Watermarking Security: Theory and Practice

*IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 10, pp. 3976—3987, 2005.

[11] **Cox, J. Kilian, T. Leighton and T. Shamoan,**

‘A secure, robust watermark for multimedia’, in Proc. Workshop on Information Hiding, Univ. of Cambridge, U.K., May 30 - June 1, 1996, pp. 175-190

[13] **Khalifa SYLLA,**

‘Etude des différentes méthodes de tatouage numérique’,

*Mémoire Master de recherche,Ecole Supérieure Polytechnique de l UCAD, décembre 2009*

[12] **C.GONZALES;P.WINTZ** *Digital Image Processing’ New York - Edition Addison Wesley*

1992 . pp 416-429

[13] **M. Grangetto, C. Guillemot , E. Magli, S. Malinowski , G. Olmo**

On the performance of arithmetic and quasi-arithmetic codes for joint source-channel coding  
*Newcom++ workshop*, Barcelona, April, 2009.

[14] **F. RAYNAL,**

«*Etudes d’outils pour la dissimulation d’information: approches fractales, protocoles d’évaluation et protocoles cryptographiques* », thèse de doctorat, Université Paris XI, mars 2002. ]

[15] **R. Gaudel and F. Bonnet and J.B. Domelevo-Entfellner and A. Roumy**

Noise variance estimation in DS-CDMA and its effects on the individually optimum receiver  
*IEEE International Workshop on Signal Processing Advances for Wireless Communications, SPAWC 2006*, June, 2006.

[16] **Ejzak, R.P., Knisely, D.N., Kumar, S., Laha, S. and Nanda, S.** (1997) BALI: A solution for high-speed

CDMA data, *Bell Labs Technical Journal*, 2(3), 124–151.

[17]**Cleo BARAS**

“Tatouage informe des signaux audio numériques”

Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, spécialité: “Signal et Images”,  
Decembre 2005.

[18] **YANG YANG**

“WYNER-ZIV coding based on TCQ and LDPC codes and extensions to multiterminal source coding”

Master of Science, Texas A&M University, August 2004.

[19] **COX, J. KILIAN, T. LEIGHTON AND T. SHAMOON,**

‘A secure, robust watermark for multimedia’, in Proc. Workshop on Information Hiding, Univ. of Cambridge, U.K., May 30 - June 1, 1996, pp. 175-190

[20]**José Marconi M. Rodrigues,**

“Transfert sécurisé d’images par combinaison de techniques de compression, cryptage et marquage”

Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, Mention Informatique,2005?

[21] **J.S. Baudry, P. Nguyen, and H. Maitre.** Estimation of geometric distortions in digital watermarking. In Proc. Int. Conf. on Image Processing,Rochester, NY, Sep. 2002

[22] **FuchunXie**

Robust and Secure Watermarking for Multimedia Traitor Tracing

---

*PhD. thesis, Thèse de doctorat en Traitement du Signal et Télécommunications, Université de Rennes 1, France, September, 2010.*

[23] **idy diop,A DIOP Sidi Mohammed FARSSI K TALL**

« Etude de la performance du code de REED SOLOMON dans la compression JPEG 2000»

Journaldes science(volume 8, numéro 2, 2008

<http://www.cadjds.org/JDSvol8num2.html>)

[24]**Olivier Rioul,**

Théorie de l'information et du codage, édition : Hermès - Lavoisier, 14/08/2007

[25]**Claude Berrou**

Codes et turbocodes ;; édition Springer ;13/08/2007

[26]**Gérard Battail**

[ ]THEORIE DE L'INFORMATION. Application aux techniques de communication ,: édition Masson ;; 04/11/1997

[27]**MORI Yvon ;**

Théorie de l'information et du codage : signal analogique, signal numérique et applications en télécommunications (Electronique pour le traitement du signal avec problèmes corrigés Vol. 5): : edition Addison-Wesley, 1995 ;

[28]**Ipatov Valeri,**

Étalement de spectre et CDMA: Principes et Applications ; édition Wiley ; 27 mai 2005

[29]**Robert C. Dixon;**

systèmes d'étalement du spectre: des applications commerciales ; édition John Wiley & Sons;1995

[30]**K. Simon Marvin ;**

Communications d'étalement du spectre Manuel ; édition McGraw-Hill; 1994