

# Tatouage d'image performant utilisant la Quantification Codée Treillis dans un domaine indépendant

C. DELPHA<sup>1</sup> I. BENKARA<sup>2</sup> S. BRACI<sup>1</sup> R. BOYER<sup>1</sup> M. KHAMADJA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S),

CNRS / Supelec / Université Paris Sud 11,  
Plateau du Moulon, 3, rue Joliot Curie, 91192 Gif sur Yvette – FRANCE

<sup>2</sup>Laboratoire de Traitement du Signal (LTS),

Département d'électronique et de l'ingénieur, 3, Rue Joliot Curie,  
Université Mentouri, Route Ain El Bey, 25000 Constantine – ALGERIE

{delpha, sbraci, rboyer}@lss.supelec.fr, {ilhem\_bm, m\_khamadja}@yahoo.fr

## Résumé

*Les besoins de protection pour la diffusion sécurisée des images ont permis de mettre en avant les solutions de tatouage numérique dans le domaine du data hiding. Dans ce domaine l'idée principale est d'insérer une information dans un document numérique en s'assurant des propriétés de robustesse, de capacité et d'invisibilité (perceptuelle et statistique). De récentes études ont montré que pour des raisons de sécurité l'invisibilité statistique était un critère très important rarement évalué. Nous proposons ici d'étudier un schéma de tatouage à information adjacente basé sur une quantification codée en treillis (TCQ) pour lequel nous ferons une insertion dans un domaine indépendant pour renforcer à la fois les propriétés de robustesse et d'indiscernabilité statistique du schéma. Nous montrons, en comparaison avec les systèmes référents, que la robustesse est nettement améliorée avec la solution proposée sans réduire de façon drastique la capacité (quantité d'information à transmettre sans erreur pour un niveau de bruit donné). Puis, grâce à une étude des fonctions de densité de probabilité prouvons que le niveau de sécurité du schéma proposé est également amélioré grâce à l'utilisation de l'Analyse en Composantes Indépendantes (ICA).*

## Mots clefs

Digital watermarking, SCS, TCQ, ICA.

## 1 Introduction

Ces dernières années, de nombreuses méthodes de dissimulation d'information ont été étudiées pour des applications du tatouage numérique. Parmi les plus performantes d'entre elles, on peut citer notamment les méthodes basées sur l'approche de Costa [1] souvent combinées à des méthodes de transformation [2]. Elles offrent généralement, dans des configurations de schéma

de tatouage avec une clef privée, de bonnes performances en termes de robustesse à des attaques. Des études ont toutefois déjà mises en évidence certaines faiblesses quant à la sécurité de ces schémas par exemple avec l'utilisation de l'Analyse en Composante Indépendantes (ICA) pour séparer signal hôte et message pour ainsi permettre l'estimation du message [3].

Initialement, l'ICA a été proposée pour résoudre des problèmes de séparation aveugle de sources dans de nombreux domaines du traitement du signal [4]. Les propriétés majeures de cette méthode sont la maximisation de l'information et la minimisation de la distorsion induite en décomposant les données en sources indépendantes.

Dans certaines études afférentes au tatouage numérique, l'utilisation de l'ICA et ses propriétés a été proposée aussi bien lors de la phase d'insertion que d'extraction de l'information à cacher. Des travaux tels que ceux de González-Serrano et al. [5] ou encore J.J. Murillo-Fuentes [6] ont décrit une méthode modifiant les composantes indépendantes d'un signal pour effectuer l'opération de marquage en s'appuyant essentiellement sur des méthodes basées sur l'étalement de spectre. On peut aussi citer les travaux de Bounkong et al. [7], mais aussi ceux de Benkara et al [8] dans lesquels sont proposés le marquage par quantification de coefficients ICA pour des images en utilisant le principe du schéma à information adjacente à l'encodeur. Dans tous ces travaux le critère essentiel qui a été évalué est la robustesse aux attaques.

Pour ce travail, nous nous intéresserons à la sécurité telle que définie par Cachin [9] du schéma à information adjacente. Certaines études ont montré l'effet bénéfique d'une quantification codée treillis (TCQ) sur l'indiscernabilité statistique [10]. Après avoir rappelé les propriétés du schéma de tatouage par TCQ, nous voulons nous appuyer sur l'ICA aussi bien à l'insertion qu'à l'extraction

de l'information cachée et ainsi montrer l'effet bénéfique de l'ICA sur la sécurité du schéma TCQ-ICA. Nous montrons également l'amélioration des performances de capacité et de robustesse par rapport au schéma initial. Une comparaison avec les schémas offrant les meilleures performances de capacité-robustesse tels que le Scalar Costa Scheme (SCS) et le bien connu Spread-Transform Scalar Costa Scheme (ST-SCS) est proposée pour montrer les bonnes propriétés des schémas.

## 2 Tatouage informé dans un domaine indépendant

Dans cette partie, nous présentons le schéma de tatouage basé sur la quantification utilisant l'analyse en composantes indépendantes (ICA) à l'insertion et à l'extraction du message (Figure 1). L'ICA est une technique statistique dont l'objectif est de décomposer un vecteur  $X \in \mathbb{R}^m$  en une combinaison linéaire de sources indépendantes, c'est-à-dire  $X = A \times \hat{X}$ , où  $\hat{X}$  est un signal à composantes indépendantes et  $A$  une matrice à coefficients réels notée matrice de mélange. Cette technique est appliquée à des problèmes où les sources peuvent être supposées indépendantes et pour lesquelles il est possible de trouver une matrice  $B$  de séparation des composantes telle que le vecteur  $\hat{X}$  obtenu par action de  $B$  sur  $X$  ait des composantes les plus indépendantes possibles.

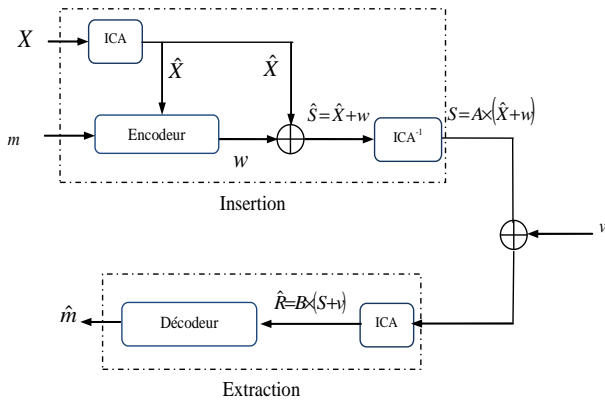


Figure 1 – Schéma de tatouage informé exploitant les propriétés de l'ICA

La procédure de tatouage proposée dans un domaine indépendant s'appuie sur les schémas basés sur la quantification et peut être décrite selon les principales étapes suivantes :

1. L'algorithme ICA est appliqué au signal hôte  $X$  pour obtenir les composantes indépendantes  $\hat{X}$ .
2. Les sources  $\hat{X}$  obtenues sont alors quantifiées et tatouées, en utilisant le principe de Costa [1] pour obtenir les composantes indépendantes tatouées et marquées  $\hat{S} = \hat{X} + w$ .

3. Une multiplication des composantes indépendantes tatouées par la matrice de mélange  $A$  (transformation ICA inverse), nous permet de récupérer les données tatouées  $S = A \times (\hat{X} + w)$  dans le domaine original du signal hôte.
4. Si on suppose que les données tatouées  $S$  sont transmises par l'intermédiaire d'un canal de communication pouvant introduire des distorsions qui seront modélisées par un bruit d'attaque  $V$  (on s'intéressera ici essentiellement à un bruit AWGN), le signal reçu  $R = S + V$  sera multiplié par la matrice de séparation  $B$  pour produire les composantes indépendantes tatouées attaquées  $\hat{R} = B \times (S + V)$ .
5. Le décodage du message  $\hat{m}$  se fait sans connaissance du signal hôte en utilisant le principe de Costa selon la méthode de quantification utilisée.

Pour notre étude, la matrice de séparation  $B$  sera considérée comme secrète pour rendre possible le décodage du message. En effet en s'appuyant sur une méthode de quantification scalaire uniforme (Schéma Scalaire de Costa) associé à l'ICA (schéma noté SCS-ICA), nous pouvons montrer que la parfaite connaissance de la matrice  $B$  est nécessaire pour le bon décodage du message  $\hat{m}$  après ajout de bruit.

Comme le montre la figure 2, lorsque la matrice  $B$  est maintenue secrète, et donc partagée entre la phase d'insertion et la phase d'extraction, le message  $\hat{m}$  peut être décodé avec un taux d'erreur binaire (BER) faible même lorsque le rapport marque à bruit (WNR) est important (faible bruit).

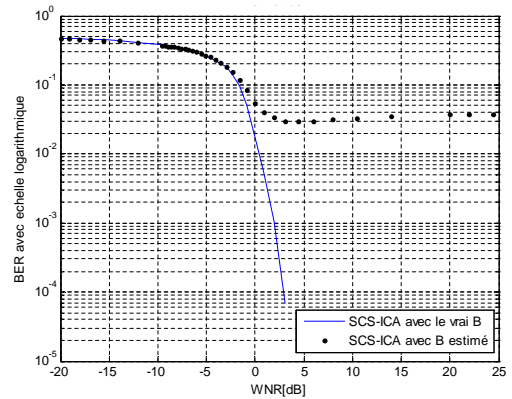


Figure 2 – Importance de l'exactitude de la matrice de séparation  $B$  au décodage

En cas d'absence de connaissance de la matrice  $B$  nous pouvons calculer une matrice  $\tilde{B}$  permettant d'effectuer la séparation en composantes indépendante du signal reçu  $R$ . Si on considère  $\tilde{B}$  comme une estimation de la matrice  $B$ , on voit que cette estimation n'est pas suffisante pour permettre le décodage du message avec un BER faible malgré un WNR élevé. Ceci laisse penser que la sécurité au sens de la fuite de l'information liée à l'estimation de la clé secrète sera renforcée sans une parfaite connaissance de  $B$ .

### 3 Tatouage utilisant la TCQ et l'ICA

#### 3.1 Quantification par TCQ en Tatouage

La Quantification Codée en Treillis est une méthode de quantification qui utilise un dictionnaire (alphabet) structuré et qui a été appliquée au tatouage spécialement pour les méthodes basées sur la quantification. Inspirée de la TCM (Trellis Coded Modulation) [11], cette méthode était généralement utilisée pour réduire la complexité et les distorsions d'un système.

Cette technique de quantification est basée sur l'idée du partitionnement proposée par Underboeck [12]. Elle consiste à partitionner un dictionnaire initial (dictionnaire structuré) en sous dictionnaires complémentaires de même taille associés aux transitions entre les différents états d'un code convolutif. Ainsi pour coder une séquence d'échantillons avec la TCQ, l'algorithme de Viterbi est utilisé [13] pour obtenir les transitions, associées au code convolutif, qui minimisent la distorsion. Chaque transition dans le treillis est codé sur  $b$  bits. Ainsi, les  $n - b$  bits résultants sont utilisés pour indexer le mot de code dans le sous-dictionnaire choisi associé à la transition.

La figure suivante représente un treillis avec 4 sous dictionnaires  $D_0, D_1, D_2, D_3$ .

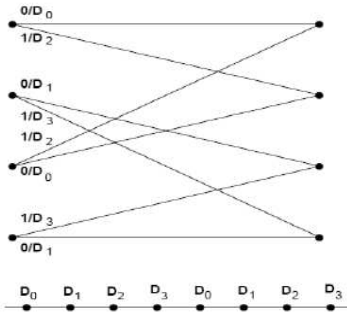


Figure 3 – Treillis 4 états avec 4 sous dictionnaires

Pour les applications en tatouage, une quantification avec la TCQ a été proposée pour éviter un partitionnement régulier généralement obtenu avec la quantification scalaire. Ce type de quantificateur est préféré pour améliorer le partitionnement du dictionnaire et ainsi améliorer l'invisibilité statistique des distorsions introduites sur la fonction de densité de probabilité du signal marqué [14].

Pour appliquer la TCQ au watermarking, les chemins du treillis sont fixés par les valeurs des bits du message. Les échantillons du signal hôte sont quantifiés en utilisant le sous dictionnaire correspondant aux transitions prises. Ainsi, le taux d'insertion est fixé à un bit par échantillons. Cette approche la plus courante dans les applications de tatouage est notée TCQ-PS (TCQ-Path selection) [15]. Elle peut être décrite selon la méthode qui suit.

Considérons un treillis défini par la fonction de transition :

$$E \times \{0, 1\} \rightarrow e$$

$$t : (e_i, m[i]) \rightarrow e_{i+1}$$

tel que  $E = \{0, 1, \dots, 2^r - 1\}$  correspond à l'ensemble des états possibles du treillis.

Ainsi, la distorsion relative à l'insertion de la marque dépend de l'état précédent du treillis et du symbole inséré :

$$E \times \{0, 1\} \rightarrow \left[-\frac{\Delta}{2}, \frac{\Delta}{2}\right]$$

$$o : (e_i, m[i]) \rightarrow d[i]$$

Donc, le sous dictionnaire peut-être noté avec l'équation suivante :

$$U_m[i] = \{\tilde{\kappa}\Delta + o(\hat{x}_i, m[i], \tilde{\kappa} \in Z)\}$$

avec  $\tilde{\kappa}$  la clé secrète utilisée à l'encodeur et au décodeur.

La variable auxiliaire  $u^* \in U_m$  qui est plus proche de l'échantillon du signal  $\hat{x}$  est calculée avec l'algorithme de Viterbi tel que :

$$u^* = \arg \min_{u \in U_m} \sum_{i=1}^N (\hat{x}[i] - u[i])^2$$

Pendant la phase de décodage, le signal reçu est à nouveau quantifié et l'algorithme de Viterbi est utilisé pour trouver les meilleurs chemins et transitions pour lesquelles nous sommes capables d'extraire le message inséré.

#### 3.2 Application dans le domaine ICA

Pour l'étude qui nous intéresse, c'est cette procédure d'utilisation de la TCQ qui a été appliquée. Le mot de code  $u^*$  le plus proche de l'échantillon  $\hat{x}$  après décomposition en composantes indépendantes est calculé en utilisant l'algorithme de Viterbi. On obtient alors le signal marqué  $S$  tel que  $S = A \times (\hat{X} + \alpha(u^* - \hat{X}))$ . La marque est alors  $w = \alpha(u^* - \hat{X})$  de telle sorte que le paramètre d'optimisation  $\alpha$  est tel que celui défini dans le schéma idéal de Costa :  $\alpha = \frac{\sigma_w^2}{\sigma_w^2 + \sigma_v^2}$ , on notera  $\sigma_w^2$  la variance de la marque et  $\sigma_v^2$  la variance du bruit.

Pour appliquer cet algorithme aux images, une phase initiale de pré-traitement de l'image est nécessaire. Elle consiste à transformer cette image comme le montre la figure 4 pour que l'application de l'ICA soit possible.

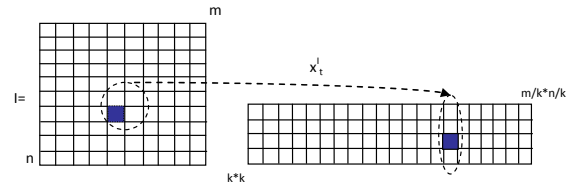


Figure 4 – Etapes de pré-traitement de l'image à tatouer pour l'application de l'ICA - Exemple pour  $k = 2$

Considérons une image originale à tatouer  $I$  de taille  $M \times N$ , cette phase se décrit selon les étapes suivantes :

1. L'image  $I$  à tatouer est d'abord divisée en blocs  $C_{p,q}$  de taille  $k \times k$  pour lesquels la gamme de variation des indices est :  $i, j = \{1, 2, \dots, k\}$ ;  $p = \{1, 2, \dots, N/k\}$  et  $q = \{1, 2, \dots, M/k\}$ . Donc nous pouvons noter les blocs  $C_{p,q}(i, j) = I(k(p-1) + i, k(q-1) + j)$ .
2. Les blocs  $C_{p,q}$  sont alors transformés en vecteurs  $x_t^I$  pour lesquels  $t = (p-1)M/k + q$ , tels que  $t = \{1, 2, \dots, MN/k^2\}$ . Nous obtenons alors un vecteur  $x(k(i-1)+j)_{(M(p-1)/k+q)} = C_{p,q}(i, j)$ . Cette transformation sera notée  $\gamma(\cdot)$  i.e  $x_t^I = \gamma(I, k)$ .
3. Les lignes sont alors projetées dans  $l = k^2$  composantes indépendantes en utilisant l'algorithme FastICA [4],  $\hat{x}_t^I = B \cdot x_t^I$ .

C'est alors sur ces composantes indépendantes de l'Image que nous appliquons ensuite notre algorithme de tatouage basé sur la quantification avec la TCQ. Pour la suite nous noterons cet algorithme TCQ-ICA.

## 4 Résultats et Discussion

Cet algorithme de tatouage a été appliqué aux images et l'évaluation de ses performances en termes de robustesse, de capacité et d'invisibilité statistique a été effectuée. Nous avons utilisé pour notre étude une base d'image en niveau de gris de taille  $512 \times 512$ . Pour garantir l'invisibilité perceptuelle lors de l'insertion, nous avons choisi d'utiliser un rapport de puissance entre le signal original et la marque (DWR) suffisamment grand. Par exemple, dans le cas de l'image "Lena", nous avons utilisé un  $DWR = 34.46dB$ . Lors de notre étude, les images sont transformées selon la procédure indiquée précédemment et nous choisissons pour l'espace de projection  $l = 4$  composantes indépendantes, ce qui correspond à une matrice de séparation  $A$  de taille  $4 \times 4$ .

Pour notre étude, nous avons évalué les performances de notre système TCQ-ICA et ainsi que celles d'autres systèmes référents comme éléments de comparaison à savoir : le SCS (Schéma de Costa exploitant une quantification scalaire), la TCQ (Schéma de Costa exploitant une quantification codée treillis), le ST-SCS (le SCS utilisant une transformée par étalement), le ST-TCQ (la TCQ exploitant les propriétés d'une transformée par étalement), le SCS-ICA (le SCS dans un domaine indépendant).

### 4.1 Robustesse

Dans un premier temps nous avons évalué la robustesse de notre schéma face à une attaque par ajout de bruit AWGN. Aussi en faisant varier la puissance du bruit par rapport à celle de la marque, nous avons tracé la courbe du BER (pour un  $DWR \approx 35dB$ ). Nous présentons les résultats obtenus sur les courbes de la figure 5.

Nous constatons que le schéma TCQ-ICA offre un niveau de robustesse meilleur que celui de la TCQ et du SCS. En fait, par rapport à ces 2 schémas de référence, pour un  $BER = 10^{-2}$ , la quantité de bruit tolérée peut-être augmentée de  $5dB$  pour une même puissance d'insertion de la

marque. Pour des taux d'erreur plus petits, cette augmentation du niveau de bruit toléré s'accroît dans le cas du SCS. mais reste quasiment la même dans le cas de la TCQ.

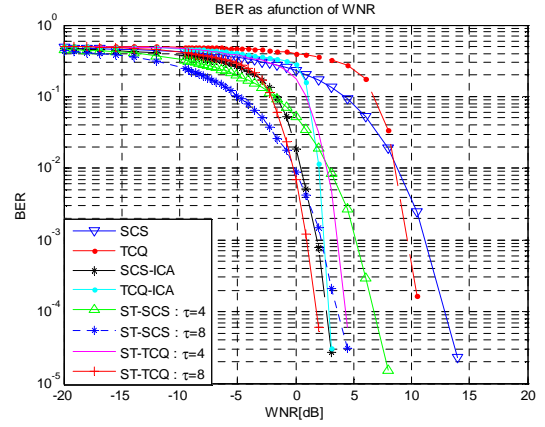


Figure 5 – Etude comparative de la robustesse du schéma TCQ-ICA avec d'autres schémas de référence

En comparaison avec les schémas mettant en oeuvre une transformée par étalement (ST-SCS et ST-TCQ), lorsque le facteur d'étalement  $\tau = 4$ , le taux d'erreur lors du décodage du message est un peu moins bon dans le cas du schéma proposé pour les  $WNR < 2dB$ . Par contre, au delà de cette valeur du WNR notre schéma tatouage basé sur la TCQ dans un domaine indépendant offre des taux d'erreur binaires nettement meilleurs. C'est seulement pour un facteur  $\tau \geq 8$  que le schéma proposé présente une robustesse moins bonne pour cette gamme de WNR.

Comparé au schéma SCS-ICA, les performances obtenues pour notre schéma sont un peu moins bonnes mais restent tout de même tout à fait correctes pour une utilisation en tatouage robuste. Ces bons résultats s'expliquent par le fait que dans le domaine indépendant si on considère la matrice de mélange  $A$  composée des éléments  $a_{i',j'}$ , le WNR dans le domaine indépendant ( $WNR_{(ICA)}$ ) peut s'écrire en fonction du WNR dans le domaine initial ( $WNR_{(Init)}$ ) par la relation suivante :

$$WNR_{(ICA)_{j'}} = 10 \log_{10} \left( \sum_{i'=1}^{k^2} a_{i',j'}^2 \cdot 10^{\frac{WNR_{(Init)_{j'}}}{10}} \right)$$

avec  $i' = \{1, \dots, k^2\}$  et  $j' = \{1, \dots, k^2\}$ . Comme les éléments  $a_{i',j'} > 1$ , calculer un taux d'erreur pour un WNR donné revient à se placer dans le domaine indépendant à un  $WNR_{(ICA)}$  beaucoup plus élevé, donc dans lequel le bruit est moins influent.

### 4.2 Capacité

Pour notre schéma nous nous sommes intéressé à la mesure de la capacité, c'est à dire de la quantité d'information que l'on peut décoder sans erreur pour un niveau de bruit donné. Les résultats obtenus sont présentés sur les courbes de la figure 6.

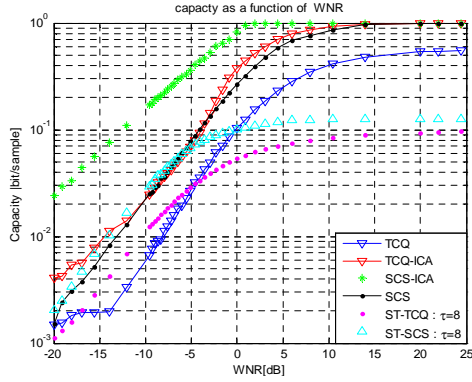


Figure 6 – Etude comparative de la capacité du schéma TCQ-ICA avec d'autres schémas de référence

Comparés aux schémas pour lesquels les performances de robustesse étaient proches, tels que ceux s'appuyant sur la transformée par étalement (ST) tels que le ST-SCS et le ST-TCQ, nous montrons sur cette figure que la capacité est semblable lorsque le WNR est faible ( $WNR < -5dB$ ) mais elle est bien supérieure en dehors de cette gamme de valeur ( $WNR > -5dB$ ). En effet il est bien connu que ces schémas basés sur le ST ont de bonnes performances de robustesse lorsque le facteur  $\tau$  augmente mais une capacité qui diminue d'autant. Ce qui n'est pas le cas pour le schéma basé sur l'ICA. Par conséquent, le compromis de performances robustesse-capacité est meilleur pour notre schéma que pour ceux basés sur le ST.

En fait, par rapport aux autres schémas de référence choisis, la capacité que nous offre notre schéma TCQ-ICA est bien meilleure que celle de la TCQ et devient du coup semblable à celle du SCS. En revanche, elle reste moins bonne que celle du SCS-ICA. Comme pour la robustesse, ces bons résultats peuvent s'expliquer par la relation sur le  $WNR_{(ICA)}$  donnée précédemment due au fait que la marque dans le domaine ICA a une puissance plus élevée que dans le domaine initial. En effet on peut écrire que :

$$\sigma_{w'_{j'}}^2 = \sum_{i'=1}^{k^2} a_{j'i'}^2 \cdot \sigma_{w_{i'}}^2$$

avec  $\sigma_{w'_{j'}}^2$  et  $\sigma_{w_{i'}}^2$  respectivement les composantes des variances de la marque dans le domaine ICA  $\sigma_{w'_{j'}}^2$  et dans le domaine initial  $\sigma_{w_{i'}}^2$ . Cette amplification de la puissance de la marque permet en effet de mieux décoder l'information sans erreur pour un niveau de bruit donné qui dans le domaine initial est plus faible.

### 4.3 Invisibilité

Pour ce critère de performance, nous avons cherché à évaluer aussi bien l'invisibilité aussi bien d'un point de vue statistique que perceptuel.

**Indétectabilité statistique.** D'un point de vue indétectabilité statistique, nous cherchons en fait à

évaluer la sécurité telle que définie par Cachin [9] en s'appuyant sur les fonctions de densité de probabilité (PDF) des signaux originaux et des signaux marqués. Nous présentons sur la figure 7 les PDF obtenues pour plusieurs valeurs de  $\alpha$  dans le cas d'une image réelle.

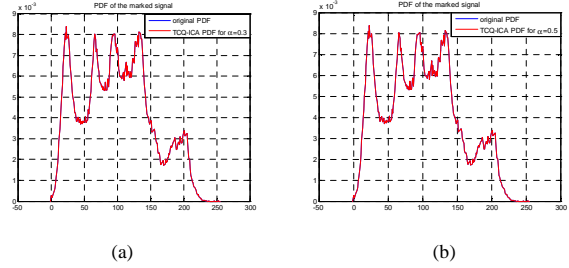


Figure 7 – Comparaison entre la fonction de densité de probabilité avant et après marquage avec le schéma TCQ-ICA pour : (a)  $\alpha = 0.3$ , (b)  $\alpha = 0.5$

En observant ces courbes nous constatons que les distorsions dues au marquage sont faibles et peu visibles sur les statistiques des signaux. Aussi, nous avons effectué une étude plus approfondie de ces signaux en utilisant la Distance de Kullbach-Leibler (KLD) entre les PDF des signaux marqués et non marqués pour le schéma proposé. Nous comparons les résultats avec ceux obtenus pour les autres schémas de référence choisis (figure 8).

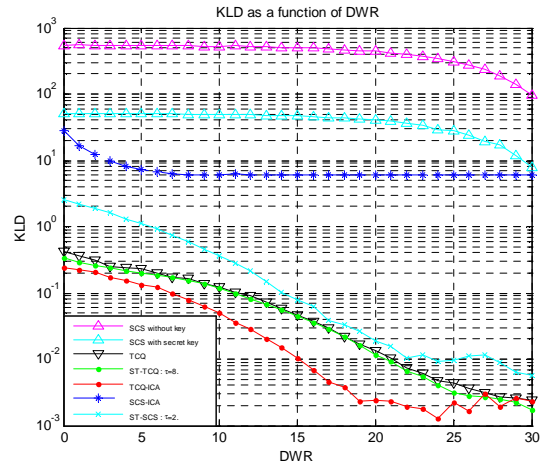


Figure 8 – Etude comparative de l'indétectabilité du schéma TCQ-ICA avec d'autres schémas de référence

Pour le schéma que nous proposons, nous obtenons une KLD faible qui diminue en fonction du rapport de puissance du signal avec la puissance de la marque (DWR). Cette réponse reste proche voire légèrement meilleure que celles obtenues pour la TCQ mais aussi pour le ST-SCS et ST-TCQ connus pour leurs bonnes performances en termes d'invisibilité statistiques [14], [10].

Sachant que le point de fonctionnement pour les images est



en général pour des valeurs du  $DWR > 25dB$  (Imperceptibilité), de tels résultats signifient qu'avec notre schéma il sera impossible de distinguer statistiquement l'image marquée de l'image originale, ce qui peut être intéressant dans des approches de tatouage robuste et indécélable.

**Imperceptibilité.** En termes de perceptibilité, nous avons cherché à comparer les images originales et images marquées entre elles pour un même message inséré. Nous présentons sur la figure 9 un exemple de ce que nous avons obtenus avec l'image de Lena dans le cas des 2 schémas jusqu'ici jugés les plus performants : SCS-ICA, TCQ-ICA.



Figure 9 – Exemple d'application aux images : (a) Originale (b) Marquée avec le SCS-ICA (c) Marquée avec le TCQ-ICA pour un  $DWR = 34, 46dB$

Dans les 2 cas, le DWR lors de l'insertion a été fixé à  $34, 46dB$ . Pour les 2 schémas il n'y a pas de différences visibles. La mesure du PSNR (Peak Signal to Noise Ratio), qui nous donne des valeurs d'environ  $40dB$  dans les 2 cas, ne fait pas apparaître de différences perceptuelles significatives pour les 2 méthodes considérées. Aucun de ces 2 schémas n'introduit de dégradations perceptuelles significatives sur les images marquées.

## 5 Conclusion

Nous présentons ici une méthode de tatouage d'images basé sur la quantification par Treillis (TCQ) dans un domaine indépendant (ICA). Il s'agit d'une méthode de tatouage avec des propriétés de robustesse comparables à celles obtenus pour des schémas référents exploitant la transformée par étalement ST. Cependant, contrairement au ST, il y a pour cette méthode une très bonne capacité. De plus, cette méthode offre un niveau de sécurité intéressant en terme d'indélectabilité statistique.

Compte tenu des bonnes performances obtenues pour ce schéma de tatouage robuste et indécélable, nous envisageons d'étendre l'analyse de robustesse à d'autres attaques spécifiques aux images du types de celles décrites dans Stirmark (compression, mise à l'échelle, ...). Quant à l'indélectabilité, nous souhaitons aussi évaluer les performances en tenant compte des statistiques à l'ordre 2.

## 6 Remerciements

Les auteurs remercient les gouvernements Français et Algériens pour leurs aides financières (ANR Projet MEDIEVALS et Programme PROFAS BAF).

## Références

- [1] M. H. M. Costa. Writing on dirty paper. *IEEE Trans. on Information Theory*, 29 :439–441, 1983.
- [2] J. J. Eggers, R. Bauml, R. Tzchoppe, et B. Girod. Scalar costa scheme for information embedding. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 51 :1003–1019, 2003.
- [3] D. Yu, F. Sattar, et K.K. Ma. Watermark detection and extraction using independent component analysis method. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 1 :92–104, 2002.
- [4] A. Hyvarinen. Survey on independent component analysis. *Neural Computing Surveys*, 2 :94–128, April 1999.
- [5] F. J. González-Serrano, H. Y. Molina-Bulla, et J. J. Murillo-Fuentes. Independent component analysis applied to digital image watermarking. Dans *ICASSP 01*, pages 1997–2000, May 2001.
- [6] J.J. Murillo-Fuentes. Independent component analysis in the blind watermarking of digital images. *Neurocomputing*, 70 :2881–2890, 2007.
- [7] S. Bounkong, B. Toch, D. Saad, et D. Lowe. Ica for watermarking digital images. *Journal of Machine Learning Research*, 4(7-8) :1471–1498, 2003.
- [8] I. Benkara Mostefa, C. Delpha, S. Braci, R. Boyer, et M. Khamadja. Improved performances of scalar costa scheme for images watermarking in an independent domain. Dans *6th Int'l Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, pages 477–482, Salzburg, Austria, Sept. 2009. IEEE.
- [9] C. Cachin. An information-theoretic model for steganography. Dans *Lecture Notes in Computer Science*, volume 1525, pages 306–318. Springer, Jan. 1998.
- [10] S. Braci, C. Delpha, R. Boyer, et G. Le Guelvouit. Informed stego-systems in active warden context : Statistical undetectability and capacity. Dans *IEEE Int. Workshop on MultiMedia Signal Processing*, Cairns, Australia, Oct. 2008.
- [11] M.W. Marcellin et T.R. Fischer. Trellis-coded quantization of memoryless and gauss-markov sources. *IEEE Trans. on Com.*, 38 :83–93, Jan. 1990.
- [12] G. Ungerboeck. Trellis coded modulation with redundant signal sets. *IEEE Communications Magazine*, 25(2) :5–25, Feb. 1987.
- [13] A.J. Viterbi. Error bounds for convolutional codes and asymptotically optimum decoding algorithm. *IEEE Trans. on Information Theory*, 13(2) :260–269, April 1967.
- [14] G. Le Guelvouit, A. Ould Bouya, J. Bourgeois, C. Delpha, et R. Boyer. Analyse stéganographique du schéma scalaire de costa. Dans *GRETSI*, 2007.
- [15] E. Esen et A.A. Alatan. Data hiding using trellis coded quantization. Dans *International Conference on Image Processing*, Singapore, Oct. 2004. IEEE.