

Tatouage d'images couleur fixes par Décomposition en Canaux Perceptuels

E. Simonetto¹ A. Saadane¹

¹ IVC (Image et VidéoCommunications) IRCCyN

Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes
Rue Christian Pauc, BP 50609, 44306 NANTES Cedex 03 – France

{elisabeth.simonetto, abdelhakim.saadane}@polytech.univ-nantes.fr

Résumé

Le tatouage d'images vise à insérer une signature à la fois robuste aux attaques, invisible et détectable. Une méthode de tatouage perceptuel et adaptatif des images couleur fixes est ici présentée. Elle repose sur un réglage de la force de la signature insérée assurant l'invisibilité. Pour cela, la sensibilité du Système Visuel Humain aux dégradations est prise en compte par une Décomposition en Canaux Perceptuels. Nous discutons de la pertinence de cette approche à partir d'expériences menées par tatouage de la composante achromatique sur plusieurs images et dans trois espaces de représentation colorimétrique antagonistes. Nous concluons sur les performances de la méthode et les voies d'amélioration possibles.

Mots clefs

Tatouage, images couleur, système visuel humain, Décomposition en Canaux Perceptuels, masquage.

1 Introduction

Le tatouage d'images vise à insérer une signature, le filigrane, à la fois robuste aux attaques, invisible et détectable. Les méthodes utilisées sur les images de niveaux de gris n'ont pas nécessairement les mêmes performances sur les images couleur. En effet, les trois canaux représentant communément une image couleur sont généralement corrélés. La modification d'une composante risque donc d'engendrer des artefacts visibles dans l'image couleur recomposée.

Certains auteurs ont alors tenté d'incruster le filigrane sur le canal Bleu, pour lequel le Système Visuel Humain (SVH) est moins sensible aux altérations [1]. Dans [2], le même filigrane est inséré sur chaque canal (Rouge, Vert et Bleu) avec une force pondérée selon l'efficacité spectrale du SVH aux trois longueurs d'onde. D'autres auteurs ont proposé un réglage adaptatif de la force limitant la dégradation perceptuelle engendrée. Dans ces travaux, le tatouage est effectué sur RVB ou sur des Systèmes de Représentation Colorimétrique (SRC) antagonistes [3], [4]. Dans [5], l'invisibilité et la détection sont comparées

entre plusieurs SRC (RVB, XYZ, YIQ, YUV) selon la force et la composante tatouée. Dans [6], le tatouage est assuré par plusieurs stratégies appliquées séquentiellement : tatouage de la luminance, modification de la pureté de la couleur et de l'histogramme d'une région, tatouage des sites de hautes fréquences spatiales sélectionnées selon une fonction de sensibilité au contraste. Le jeu des forces est adapté par limitation de la dégradation engendrée. Dans [7], le filigrane est inséré dans la réponse spectrale de l'illuminant. Ces différentes expériences sont menées par tatouage dans le domaine spatial ([1], [3], [6]) et dans des domaines transformés (DCT [2], ondelettes [5]). Plus récemment, la Transformation de Fourier Quaternionique [8] a été testée pour le tatouage des images couleur.

Dans [4], le tatouage est perceptuel. Les filtres de Gabor permettent de produire une Décomposition en Canaux Perceptuels (DCP) de l'image. Chacun de ses canaux, ou sous-bandes, est censé correspondre à la sollicitation de différents champs récepteurs du SVH. Une sensibilité au contraste théorique peut être associée à chaque sous-bande. Ceci permet de définir la force maximale du filigrane à insérer dans chaque sous-bande pour assurer l'invisibilité. Cette approche a été appliquée pour le tatouage des images de niveaux de gris par exemple dans [9] et [10]. L'extension aux images couleur n'est cependant pas immédiate du fait d'interactions entre composantes. Ces interactions sont à l'origine d'effets de masquage qui modifient les seuils de sensibilité aux contrastes sur une sous-bande donnée (voir dans [11] et [12]).

Nous nous intéressons dans cette première étude au tatouage perceptuel dans des SRC luminance-chrominance dits antagonistes. Pour ces SRC, les composantes de chrominance reflètent les oppositions Rouge-Vert (RV) et Bleu-Jaune (BJ) telle que notre SVH code l'information visuelle dans la rétine (voir rappels dans [11]). Le schéma de tatouage (insertion et détection) est présenté dans la section 2. Dans la section 3, nous menons des expériences afin d'étudier son comportement selon les critères d'invisibilité, de détection et de robustesse aux attaques. La section 4 présente nos conclusions et perspectives.

2 Méthodologie

2.1 Des valeurs numériques RVB vers les quantités subjectives avant DCP

La DCP s'opère sur des signaux tels qu'ils seraient produits par les photorécepteurs du SVH. Les valeurs numériques d'une image RVB doivent donc subir des transformations avant DCP pour modéliser l'observation d'une valeur numérique sur un écran, l'observation d'une quantité photométrique par l'œil et le codage en composantes achromatique et chromatiques.

2.1.1 Modélisation de l'écran

La valeur photométrique affichée sur un écran dépend de ses luminances minimales et maximales et de sa fonction Gamma. Nous pouvons écrire pour les composantes R, V et B :

$$L^k = L_{\min}^k + (L_{\max}^k - L_{\min}^k) \left(\frac{VN_k}{255} \right)^\gamma \text{ avec } k=r, v, b.$$

L indique une luminance et VN une valeur numérique. Les valeurs L_{\min} , L_{\max} et γ sont idéalement mesurées sur l'écran avec un photomètre pour chaque signal R, V et B. Nous supposons que l'écran est standard et de type CRT (Cathode Ray Tube) avec $\gamma^r = \gamma^v = \gamma^b = 2.2$ [14]. De plus, dans la suite du traitement, nous considérons des valeurs normalisées par L_{\max} . Nous simplifions l'équation précédente en négligeant la valeur (L_{\min}/L_{\max}) :

$$L^k = L_{\max} \left(\frac{VN_k}{255} \right)^\gamma$$

Sous cette hypothèse, seule la luminance maximale d'un signal achromatique est utile. Nous avons : $L_{\max} = 70 \text{cd/m}^2$.

2.1.2 Conversion vers trois SRC antagonistes

Une synthèse bibliographique des SRC est proposée dans [15] et sur les modèles de perception dans [11]. Nous proposons de travailler sur trois SRC antagonistes. Ils dérivent du système de primaires LMS modélisant les cônes du SVH. Le troisième en est une simplification.

$$1) \text{ Système de Krauskopf [11], [13]} : \begin{cases} A = \frac{1}{2}(L+M) \\ C_1 = \frac{1}{2}(L-M) \\ C_2 = \frac{1}{2}(S - \frac{L+M}{2}) \end{cases}$$

$$2) \text{ Système de Faugeras [16]} : \begin{cases} A = 0.612L + 0.369M + 0.019S \\ C_1 = \frac{1}{2}(L-M) \\ C_2 = \frac{1}{2}(S-L) \end{cases}$$

$$3) \text{ Système de Ballard (wb,rg,yb)} : \begin{cases} A = \frac{1}{3}(R'+G'+B') \\ C_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}(R'-G') \\ C_2 = B' - \frac{R'+G'}{2} \end{cases}$$

avec R', G', B' les composantes normalisées non linéaires. Précisons la méthode de passage dans le système des cônes LMS. Les composantes RVB normalisées non linéaires sont tout d'abord projetées dans le système des primaires CIE-XYZ. Pour cela, nous nous plaçons sous la recommandation ITU BT709 [14], un illuminant D65 et prenons en compte les modifications de Judd 1951 [17] :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.409568 & 0.355041 & 0.179167 \\ 0.213389 & 0.706743 & 0.079868 \\ 0.018629 & 0.114620 & 0.912367 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R' \\ V' \\ B' \end{pmatrix}$$

La matrice Smith-Pokorny peut ensuite être utilisée [17] :

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15514 & 0.54312 & -0.03289 \\ -0.15514 & 0.45684 & 0.03289 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.01608 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

2.2 DCP des images couleur

La DCP fournit un pavage en sous-bandes du spectre de l'image des quantités photométriques, respectant la sensibilité du SVH aux différentes fréquences spatiales. Pour la composante achromatique, nous utilisons la DCP de la Figure 1 [10]. Des filtres radiaux et directionnels permettent d'extraire les 17 sous-bandes ainsi définies. La DCP des deux composantes de chrominance est obtenue par les deux premières bandes radiales de la DCP précédente (voir [11]). Nous obtenons alors 5 sous-bandes pour chaque composante de chrominance. Les paramètres de ces DCP (nombre de bandes radiales, sélectivités radiale et angulaire de chaque bande) résultent de tests psychovisuels. En particulier, la DCP en chrominance a été validée expérimentalement pour un espace ACr_1Cr_2 particulier [13], [11]. Nous pensons que cette DCP peut être utilisée pour d'autres systèmes antagonistes sans introduire d'importantes erreurs dans nos conclusions pour deux raisons principales. Premièrement, le seuil de sélectivité à 1.5 cy/d° entre les deux premières bandes radiales repose sur un encadrement de la valeur exacte et sur l'observation de comportements comparables entre composantes achromatique et chromatiques. Deuxièmement, on peut s'attendre à des comportements comparables entre SRC antagonistes qui reposent sur une modélisation du codage RV et JB des signaux par le SVH avant diverses combinaisons.

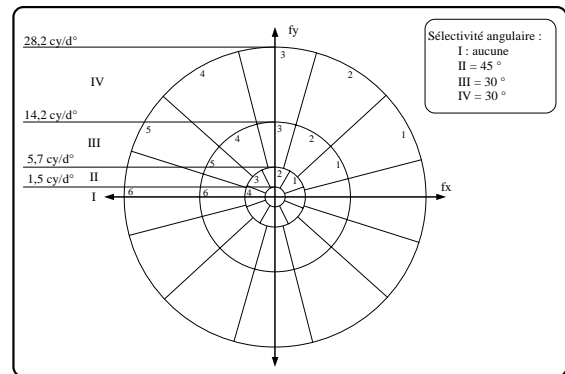


Figure 1 - DCP en luminance.

2.3 Schéma d'insertion

Les composantes achromatique et chromatiques sont ainsi décomposées en canaux perceptuels. La sélection des sites tatoués résulte du choix des sous-bandes à tatouer pour chaque composante : 17 possibilités pour la composante A

et 5 possibilités pour les deux composantes chromatiques. L'insertion sur une sous-bande donnée est réalisée par addition dans le domaine spatial. Pour cela, une image est reconstruite par DCP inverse à partir du spectre initial restreint à la sous-bande radiale i et angulaire j voulue. Nous parlerons d'imagette de la sous-bande (i,j) . La force du tatouage est ajustée par un critère psychovisuel d'invisibilité des dégradations adapté à chaque sous-bande. Dans ce premier travail, nous proposons de nous intéresser au tatouage de la composante achromatique. Sans modélisation des effets de masquage inter-composante, l'insertion s'écrit [10] :

$$L_{ij}^W(m,n) = \begin{cases} L_{ij}^{A0}(m,n) + \Delta L_{ij}^A(m,n) W_{ij}(m,n) & \text{si } |L_{ij}^{A0}(m,n)| > \Delta L_{ij}^A(m,n) \\ L_{ij}^{A0}(m,n) & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec :

- $L_{ij}^W(m,n)$ l'imagette tatouée de la sous-bande (i,j) de la composante A , au pixel (m,n) .
- $L_{ij}^{A0}(m,n)$ l'imagette originale,
- $W_{ij}(m,n)$ le filigrane inséré, séquence pseudo aléatoire de distribution normale (moyenne nulle, variance unitaire),
- $\Delta L_{ij}^A(m,n)$ la force du tatouage. Elle représente la variation maximale de luminance pouvant être ajoutée sans dégradations visibles. Elle s'exprime en fonction d'un modèle de contraste seuil : $\Delta L_{ij}^A(m,n) = \Delta C_{ij}^A \overline{L}_{ij}^A(m,n)$.

Nous avons d'après [10] :

- $\overline{L}_{ij}^A(m,n) = \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{l=1}^{card(k)} L_{kl}^A(m,n)$, luminance moyenne locale au point (m,n) ,
- $\Delta C_{ij}^A = \frac{E_{ij}^A}{L^{A0}}$, contraste seuil de la sous-bande (i,j) . E_{ij}^A est

l'énergie de la sous-bande (i,j) . \overline{L}^{A0} est la luminance moyenne de la composante A . F_i est un facteur qui dépend des caractéristiques de la bande radiale i : $F_1=0$, $F_2=0.79$, $F_3=0.98$, $F_4=1.18$.

La composante achromatique tatouée et les deux composantes chromatiques originales définissent l'image couleur RVB tatouée après opérations inverses de celles présentées dans le paragraphe 2.1.

2.4 Schéma de détection

La vérification d'un filigrane W utilise l'image originale, l'image tatouée. Les deux images subissent les mêmes transformations que dans le schéma d'insertion (modélisation écran, projection dans le SRC choisi, DCP). La différence, $\{W'_{i,j}\}$, entre imagettes de l'image originale et de l'image tatouée fournit les imagettes du filigrane inséré. Les imagettes $\{W_{i,j}\}$ sont aussi calculées. La présence du filigrane W est confirmée par seuillage des coefficients de corrélation entre chaque $W_{i,j}$ et $W'_{i,j}$: $\rho_{i,j}$. Le critère de détection retenu est le maximum des coefficients $\rho_{i,j}$. Ce calcul est effectué sur les trois composantes et la réponse du détecteur est la moyenne des

trois coefficients retenus. Selon l'application, la détection peut aussi être requise sans l'image originale. Dans ce cas, le coefficient de corrélation est calculé entre imagettes du filigrane W et celles de l'image tatouée directement. Un seuil théorique de décision est indiqué dans [10].

3 Expériences

Les expériences sont menées sur deux images Bab et Isa (Figure 2). Les sous-bandes tatouées sont II-2,III-3,IV-4.



Figure 2 : Images RVB 256x256 Bab et Isa.

3.1 Invisibilité

Nous observons l'effet d'augmenter la force par un facteur multiplicatif k allant de 1 à 5. L'image tatouée est observée à une distance d'environ 2 fois la hauteur de l'écran. Une note de qualité entre 1 et 5 est attribuée : médiocre (1), mauvaise (2), assez bonne (3), bonne (4), excellente (5). Les résultats dans le Tableau 1 montrent que la dégradation devient gênante pour $k=5$ (exemple Figure 3). Sur les deux images, il n'est pas apparu de comportements très différents entre les trois SRC testés. Des tests plus nombreux sont donc nécessaires pour conclure. Par ailleurs, la mesure du PSNR entre image originale et image tatouée, dans différents SRC (LAB, YCbCr), ne s'est pas révélée pertinente. En effet, les valeurs du PSNR restent élevées alors que les dégradations sont visibles.

Tableau 1 - Qualité visuelle des images tatouées selon k .

Système :	Faugeras			Krauskopf			Ballard		
k	1	2.5	5	1	2.5	5	1	2.5	5
Image Bab	4	3	3	4	3	3	4	3	3
Image Isa	4	3	2	4	3	3	4	4	3



Figure 3 - Extrait de l'image Isa originale et des images tatouées dans le système de Krauskopf avec $k=1, 2.5$ et 5 .

3.2 Détection

La vérification du filigrane avec l'image originale aboutit à de bons résultats pour les trois systèmes et sur les deux images. La valeur du coefficient de corrélation est alors

proche de 1/3 pour le bon filigrane et reste inférieure à 10% pour 99 autres filigranes. Sans l'image originale, le filigrane n'est pas reconnu lorsque $k=1$. Il en est de même si l'on tatoue simultanément toutes les sous-bandes de I, II, III et IV. La présence du filigrane est par contre vérifiée pour $k=5$ lorsque toutes les sous-bandes sont tatouées.

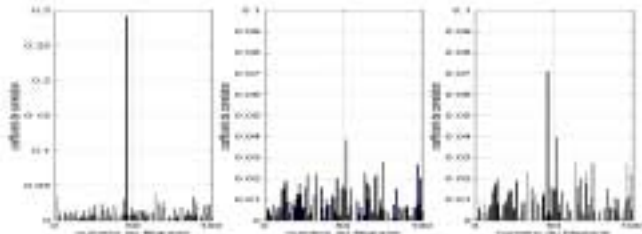


Figure 4 - Réponse du détecteur à 100 filigranes différents, image Bab, système de Krauskopf, avec image originale ($k=1$) et sans image originale ($k=1$ et 5). Le filigrane inséré correspond au pic sur la première figure et sur la dernière.

3.3 Robustesse

3.3.1 JPEG

Les images Bab et Isa sont enregistrées au format JPEG avec un facteur de qualité de 50%. Au-delà de cette valeur, les images trop détériorées n'ont plus d'intérêt. Pour les deux images, la présence du filigrane inséré est vérifiée (Figure 5).

3.3.2 Ajout d'un bruit

Nous testons maintenant l'ajout d'un bruit gaussien de moyenne nulle et de variance 20 sur les deux images. La Figure 5 montre que la réponse du détecteur au filigrane inséré se distingue de celle des 99 autres filigranes, dès $k=1$.

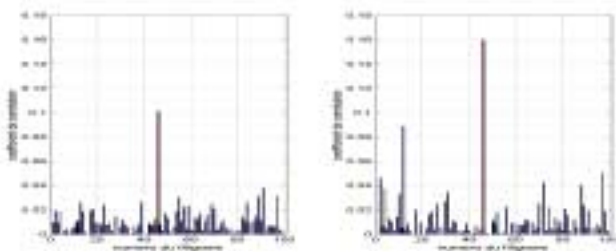


Figure 5 - Réponse du détecteur à 100 filigranes différents, image Bab, système de Krauskopf, $k=1$, après attaque JPEG et ajout d'un Bruit Gaussien.

4 Conclusions

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés au tatouage perceptuel par DCP d'images couleur fixes en insérant le filigrane dans un SRC antagoniste : système de Faugeras ou de Krauskopf, qui exploitent les signaux issus des cônes LMS, ou système de Ballard qui en est une simplification. Des résultats sur deux images classiques ont été observés lorsque la marque est incrustée sur la

composante achromatique. Ils montrent que l'invisibilité semble respectée avec une force adaptée aux effets de masquage. La réponse du détecteur avec l'image originale permet de vérifier le filigrane inséré même après compression JPEG et ajout d'un bruit gaussien. Sans l'image originale, la méthode n'a pas permis de vérifier la présence du filigrane avec le réglage adaptatif des forces. La vérification réussit pour une force pondérée par 5 et avec insertion redondante sur toutes les sous-bandes de la composante achromatique. L'insertion multi-composantes pourra sans doute améliorer ce résultat. Dans cette perspective, la modélisation des effets de masquage inter-composante sera intégrée dans le calcul adaptatif des forces. Pour cela, une modélisation de l'élévation des seuils de sensibilité due aux interactions dans l'espace ACr_1Cr_2 est fournie dans [12] et pourra être utilisée.

5 Références

- [1] M. Kutter, F. Jordan, F. Bossen. Digital Signature of Color Images using Amplitude Modulation. Dans *Proc. SPIE ET'97*, San Jose, California, pages 518-526, 1997.
- [2] A. Piva, F. Bartolini, V. Cappellini, M. Barni. Exploiting the cross-correlation of RGB-channels for robust watermarking of color images. Dans *Proc. ICIP'99*, Kobe, Japan, vol. I, pages 306-310, 1999.
- [3] D.J. Fleet, D.J. Heeger. Embedding invisible information in color Images. Dans *ICIP'97*, Santa Barbara, pages 532-535, 1997.
- [4] E. Sayrol, J. Vidal, S. Cabanillas, S. Santamaria. Optimum watermark detection in color images. Dans *ICIP'99*, Kobe, Japan, 1999.
- [5] A. Parisi, P. Carré, C. Fernandez-Maloigne. Colour watermarking: study of different representation spaces. Dans *CGIV'02*, pages 390-393, Poitiers, 2002.
- [6] G. Chapeyron, A. Trémeau. Watermarking of color images based on a multi-layer process. Dans *CGIV'02*, pages 77-80, Poitiers, 2002.
- [7] G. Chapeyron, A. Trémeau. Watermarking of color images based on spectral modulation of viewing illuminant. Dans *CGIV'02*, pages 326-331, Poitiers, 2002.
- [8] P. Bas, N. Le Bihan, J.-M. Chassery. Color Images Watermarking using Quaternion Fourier Transform. *IEEE International Conference on Acoustics speech and signal processing (ICASSP)*, Hong Kong, 2003.
- [9] J.F. Delaigle, C. De Vleeschouwer, B. Macq. Watermarking algorithm base don human visual model. *Signal Processing*, 66: 319-335, 1998.
- [10] A. Saadane, F. Atrousseau. Tatouage perceptuel et adaptatif d'images fixes. *Traitement du Signal*, 18(4): 235-247, 2001.
- [11] L. Bedat. *Aspects psychovisuels de la perception des couleurs. Application au codage d'images couleur fixes avec compression de l'information*. Thèse de l'Université de Nantes, 1998.
- [12] P. Le Callet, D. Barba. Psychovisual quantization of color images. Dans *CGIV'02*, pages 52-55, Poitiers, 2002.
- [13] J. Krauskopf, D.R. Williams, D.W. Heeley. Cardinal directions of color space. *Vision Research*, 22: 1123-1131, 1982.
- [14] Recommandation ITU-R - BT.709-5. *Valeur des paramètres des normes de TVHD pour la production et l'échange international de programmes*. 2002.
- [15] N. Vanderbroucke. *Segmentation d'images couleur par classification de pixels dans des espaces d'attributs colorimétriques adaptés. Application à l'analyse d'images de football*. Thèse de l'Université de Lille 1, 2000.
- [16] O.D. Faugeras. Digital color image processing within the framework of a human visual model. *IEEE Trans. ASSP*, 27(4):380-393, 1979.
- [17] F. Vienot, H. Brettel, J.D. Mollon. Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats. *Color Research and Application*, 24(4):243-252, 1999.