

Une approche psychovisuelle pour le tatouage des images couleur

Pascal LEFEVRE[‡], Philippe CARRE¹, Philippe GABORIT²

¹Laboratoire XLIM Poitiers
Université de Poitiers, BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil, France

²Laboratoire XLIM Limoges
Université de Limoges, 123, avenue Albert Thomas - 87060 LIMOGES CEDEX, France
pascal.lefevre@univ-poitiers.fr, philippe.carre@univ-poitiers.fr
gaborit@unilim.fr

Résumé – L’information de la couleur n’a pas toujours été exploitée pour le tatouage numérique. Ces approches ont traité la couleur composante par composante puis des approches vectorielles du traitement de la couleur ont permis d’améliorer de manière importante le domaine du tatouage numérique couleur. Il y a eu des travaux sur des approches perceptuelles mais très peu se portent sur la perception des différences de couleur par le système visuel humain dans le cadre d’une application pour le tatouage numérique. Dans cet article, nous proposons un nouvel algorithme de tatouage pour les images couleur capable de minimiser la perception des différences de couleur perçue par le système visuel humain. Cette méthode peut être adaptée à de nombreuses méthodes de tatouage en niveau de gris telles que les méthodes QIM [1]. L’algorithme que nous proposons se base sur un modèle psychovisuel de l’œil humain étudié par D. Alleysson [2]. Nos résultats d’expérience montrent des améliorations encourageantes en terme de robustesse et d’invisibilité de la marque. Lors d’une adaptation d’une méthode de tatouage en niveau de gris pour les images couleur, nous montrons également que le modèle permet de réduire les taux d’erreur pour la méthode STDIM-QIM.

Abstract – Over the last few years, considering 3D vectors as one color information instead of three independent vector components has significantly improved the color watermarking field. There have been some research about perceptual approaches but there are few about the perception of color differences of the human vision system (HVS) for watermarking applications. This paper propose a new color watermarking algorithm able minimize the perception of color differences. It can easily be adapted to many watermarking schemes such as quantization based schemes [1]. This algorithm is based on a psychovisual model of the human eye studied by D. Alleysson [2]. The results showed good improvements in terms of watermark invisibility and robustness to image processings: we compared quantization methods working in grayscale and its color adaptation to show model stability or improvement.

1 Introduction

Dans la littérature, il existe de nombreuses méthodes de tatouage pour les images couleur. Les premières solutions ([3, 4]) ont proposé de tatouer sur la composante bleue pour minimiser les changements perceptuels de l’image tatouée. D’autres méthodes ont consisté à modifier la composante de luminance [5] ou celle de la saturation [6]. Ces méthodes ont traité les composantes des vecteurs couleur de manière indépendante menant à des problèmes de robustesse du tatouage. Plus tard, d’autres méthodes utilisant des approches vectorielles du traitement des images couleur sont apparues. Abadpour et al. [7] ont exploité des informations issues des projections sur les composantes principales d’une analyse en composantes principales mais n’ont pas pris en compte le système visuel humain (SVH). La méthode de tatouage couleur développée par Charreyron G. and Trémeau A. [8] a spécialement été étudiée pour les images couleur. Cette méthode insère une marque dans un

espace couleur et prend en compte la faible sensibilité du SVH à percevoir les petites différences de couleur. Des plus travaux récents (tel que [9]) existent et portent sur le tatouage couleur dans des domaines transformés ont été mené mais ne considère pas la couleur de la même façon que le SVH. À notre connaissance, la perception des différences de couleur n’a pas complètement été explorée. Nous proposons un algorithme de quantification vectorielle (section 2) minimisant la perception des différences de couleur du SVH. Cet algorithme est basé sur une approche mathématique et psychovisuelle du SVH (section 3) introduite par D. Alleysson [2]. Nous validons notre nouvelle méthode par des expériences sur la méthode STDIM-QIM définie dans la section 4 en terme d’invisibilité et de robustesse à différentes attaques (section 5).

2 Quantification couleur

Il existe différentes représentations de la couleur tel que l’espace RGB qui est une des représentations de la couleur la plus utilisée et la perception de celle-ci par l’être humain varie également : c’est un phénomène non-linéaire.

*Nous remercions David Alleysson pour les discussions sur le modèle psychovisuel et toutes les personnes qui nous ont aidé à améliorer cette article. Également, nous remercions Délégation Générale de l’Armement pour son financement.



FIGURE 1 – Simulation d'un bruit de quantification vectorielle. $P = (42, 64, 84)$ est la couleur de départ (à gauche), $u_P = (0.78, 0.61, 0.11)$ la direction optimale et $u = (1, 0.08, 0.01)$ une direction aléatoire. De la gauche vers la droite, la ligne du haut représente les couleur $P + 4k.u_P$ et celle du bas $P + 4k.u$ pour $k = 0, \dots, 10$.

Nous pouvons alors définir un quantificateur vectoriel permettant d'insérer des modifications scalaire (par exemple la célèbre méthode QIM [10]) où nous pouvons clairement voir le problème de la manipulation de la couleur. Soit P la valeur d'un pixel couleur. La couleur modifiée P' est calculée de la façon suivante : $P' = P + (K' - K).u$ avec $K = \langle P, u \rangle$ et u un vecteur direction dans un espace couleur. Cette équation modifie la couleur P en fonction de la quantification de K selon l'axe de direction u . Nous pouvons illustrer le phénomène non-linéaire de la perception des couleurs par le SVH grâce à la figure 1. On voit que lorsque $k = 10$, la ligne du bas évolue de la couleur 'Quincy'¹ vers la couleur 'empereur' alors que celle du haut évolue de la couleur 'Quincy' vers la couleur 'Bronze olive'. Pour le SVH, c'est la ligne du haut qui est la moins dégradée par la quantification.

Nous constatons que le vecteur direction u doit être choisi correctement si un tatouage requiert un niveau d'invisibilité maximum. Comme nous venons de l'expliquer plus haut, il existe un choix optimal de vecteur direction pour minimiser la perception des différences de couleur. Ce concept existe déjà pour le tatouage des images en niveau de gris. Par exemple, le modèle de Watson [11] est utilisé avec une méthode de quantification pour moduler le pas de quantification dans le but de minimiser la perception des différences de niveaux de gris. Il reste une difficulté à surmonter. Au décodage, il faut pouvoir recalculer le vecteur direction u . Si u n'est pas le même pour chaque couleur P , avant de pouvoir décoder la marque, il faut calculer la valeur de $\langle P', u \rangle$ c'est à dire calculer u . Dans la section suivante, nous montrons comment choisir les directions optimales u_P pour toute couleur P dans le cadre du tatouage couleur.

3 Approche psychovisuelle du système visuel humain

Le système visuel humain fonctionne grâce à des photorécepteurs situés dans la rétine qui capte la lumière entrant dans l'oeil. Plus précisément, les cônes L , M et S sont responsables de la vision en couleur. Ils sont sensibles et stimulés par différentes longueur d'ondes. En mesurant les réponses électriques à différents flash de lumière de chaque cône, la non-linéarité de la vision en couleur a pu être démontrée (chapitre 4 de [12]). Les expériences montrent que la percep-

tion de la couleur dépend de l'état d'adaptation du SVH. Cet état d'adaptation est très bien modélisé par la loi de Naka-Rushton (cinétique des photorécepteurs). Nous avons : $x = f(X, X_0) = X/(X + X_0)$ avec x le niveau de transduction, X le niveau d'excitation du cône produit par la lumière et X_0 l'état d'adaptation. X_0 est modifié en fonction du niveau d'excitation moyen du photorécepteur. Grâce aux travaux de D. Alleysson [2], nous modélisons la surface d'un volume \mathcal{E} de centre P_{RGB} dans l'espace couleur RGB où tout élément de la surface \mathcal{E} possède le même niveau de perception de différences de couleur avec P_{RGB} . Chaque cône est paramétré par : $l = \alpha_L f(L, L_0)$, $m = \alpha_M f(M, M_0)$ et $s = \alpha_S f(S, S_0)$. Les facteurs $(\alpha_L, \alpha_M, \alpha_S) = (1665, 1665, 226)$ sont des gains et $(L_0, M_0, S_0) = (66, 33, 0.16)$ les états d'adaptation respectifs des cônes L , M et S . Ces constantes ont été choisies pour obtenir la meilleure correspondance avec les ellipses de Mac Adam dans l'espace couleur xyY (calculée dans le chapitre 4 de [12]) et nous permettent de simuler le comportement du SVH. Ce modèle étend les travaux de Mac Adam [13] car au lieu d'avoir des ellipses dans un plan de luminance constant, nous pouvons construire un espace couleur contenant des volumes ressemblant à des ellipsoïdes. Dans la figure 2, nous montrons la transformation d'une sphère (de centre $P_{lms} = (23, 48, 195)$) dans l'espace couleur lms vers l'espace RGB. Sur la partie droite, nous pouvons voir la transformation de la sphere en une ellipsoïde \mathcal{E} de centre $P_{RGB} = (200, 255, 255)$. Comme nous le verrons dans la sous-section suivante, l'ellipsoïde \mathcal{E} représente l'ensemble des points qui ont la même perception des différences de couleur par rapport à P_{RGB} dans l'espace RGB.

L'ellipsoïde \mathcal{E} de centre P_{RGB} représente l'ensemble des points qui ont la même perception des différences de couleur avec P_{RGB} . Choisir le point le plus loin P' de P_{RGB} minimise la perception des différences de couleur par rapport à un autre point P'' se trouvant à la même distance de P_{RGB} . Le vecteur direction extrait est donc $u_{P_{RGB}} = \frac{\overrightarrow{P'P_{RGB}}}{\| \overrightarrow{P'P_{RGB}} \|}$ pour tout P_{RGB} . Dans le contexte du tatouage numérique, choisir un vecteur direction optimal ne permet pas de réduire le bruit de quantification mais de réduire les distortions perçues par le SVH.

4 Adaptation couleur de STDM-QIM

Nous avons choisi arbitrairement la méthode STDM-QIM pour une adaptation au tatouage couleur. C'est une adaptation vectorielle de la méthode QIM scalaire basique. Brièvement, la quantification est faite à partir de la projection sur un vecteur aléatoire u (voir [1] pour plus de détails). La première étape consiste à calculer u_{P_i} et $S_i = \langle P_i, u_{P_i} \rangle$ pour $1 \leq i \leq N_P$, N_P le nombre de pixel couleur quantifié. Deuxièmement, utiliser le quantificateur STDM-QIM tel que $S'_i = Q_m(S_i, \Delta)$, Δ le pas de quantification et $m = 0, 1$. Troisièmement, modifier les couleurs P_i tel que $P'_i = P_i + (S'_i - S_i)u_{P_i}$. A l'étape de détection, appliquer la première étape sur les pixels couleur modifiés P''_i et utiliser le décodeur STDM-QIM sur les scalaires $S''_i = \langle P''_i, u_{P''_i} \rangle$. Cette étape est délicate pour le calcul de $u_{P''_i}$ si la distance entre P'_i et P''_i est trop grande. En théorie, les

1. Les noms de couleur ont été trouvé sur le site <http://chir.ag>

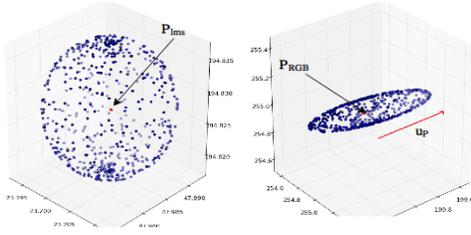


FIGURE 2 – À gauche : une sphère (ensemble des points de la surface) de centre P_{lms} dans l'espace lms et à droite le volume correspondant dans l'espace RGB . En rouge, le vecteur direction u_P optimal. Cette figure illustre le phénomène non linéaire de la perception des couleurs dans l'espace RGB : chaque point de la sphère lms possède la même perception des différences de couleur par rapport à P_{lms} . Quand ces points sont convertis dans l'espace RGB , on obtient un volume déformé similaire à un ellipsoïde.

variations de couleur ne sont pas brutales. Expérimentalement, les vecteurs directions ne sont pas si différents d'une couleur à une autre ce qui permet d'assurer un décodage performant.



FIGURE 3 – Comparaisons avec une version recadrée de Lenna à 60×60 avec un taux d'information inséré de $ER = 1/2$. La première ligne d'images ont été tatouées avec l'approche constante (GA) et la seconde ligne avec l'approche adaptative (AA). Pour chaque colonne, les deux images ont été tatouées avec le même niveau de bruit de quantification augmentant de gauche à droite. Egalement pour chaque paire d'image (colonne), le taux d'information et les positions d'insertion sont les mêmes.



FIGURE 4 – Versions recadrée de l'image Kodak 'kodim23' avec les mêmes conditions d'expériences que la figure 3.

5 Expériences et résultats

Pour démontrer l'efficacité de notre méthode, nous allons nous concentrer sur l'invisibilité puis sur la robustesse de la marque. Pour toutes les expériences, nous avons utilisé la base

d'image Kodak et avons inséré des marques dans le domaine spatial. En utilisant la quantification vectorielle, une approche simple consiste à utiliser un vecteur direction constant $u = (1, 1, 1)$ (en général, choisir l'axe de luminance est un compromis correct pour garantir une invisibilité satisfaisante de la marque). La seconde approche est d'adapter le vecteur direction en fonction de sa couleur. L'approche adaptative permet d'obtenir une meilleure invisibilité du tatouage pour un même niveau de distortion (DWR) que l'approche constante pour le SVH. Dans la figure 3, la première ligne d'image marquée (approche constante (GA)) contient plus de bruit de quantification que la deuxième ligne (approche adaptative (AA)). La figure 4 permet également d'observer le même phénomène. Cependant, cette invisibilité n'est pas parfaite. Sur le bec du perroquet apparaît une tâche bleue. À l'origine, cette tâche est présente sur l'image 'Kodim23' mais reste très discrète. Dans certaines situations, l'approche adaptative 'exagère' certaines couleurs au fur et à mesure que le bruit de quantification augmente. Pour valider cette amélioration visuelle, nous avons menés une expérience dont les résultats sont présentés dans le tableau 5 avec les mêmes paramètres que dans la figure 3. Pour tous les sujets de tests (15 personnes), nous pouvons voir que seulement 4% des images ont été décrites comme 'moins bruitées' avec l'approche constante. Nous pouvons conclure que tatouer avec l'approche constante mène à une invisibilité de marque moins bonne comparée avec l'approche adaptative. Au niveau de la robustesse, nous avons calculé pour chaque attaque des taux d'erreur binaire (BER) pour la méthode STDM-QIM en niveau de gris (noté GS) et pour les deux adaptations couleur avec les approches GA et AA. Nous avons fait des mesures avec 100 répétitions (signatures aléatoires) pour une image donnée. Chaque point des graphiques représente une moyenne de taux d'erreur à ± 0.01 près. Chaque image a été marquée avec un taux d'information inséré de $1/32$ (c'est le nombre de bits insérés fois la taille des vecteurs divisé par le nombre total de pixels). Les deux attaques choisies (les plus communes) sont la compression JPEG et le bruit gaussien. Les figures 6 et 7 montrent que les courbes GA et AA ont des taux d'erreur plus faibles que leur courbe GS respective, notre méthode couleur améliore donc la robustesse de la marque pour le même niveau de distortion (DWR = 35dB). De plus, on peut également ajouter que, puisque les courbes GA et AA se superposent, nous pouvons obtenir un meilleur compromis invisibilité/robustesse car visuellement, l'approche AA permet d'avoir une meilleure invisibilité de la marque.

6 Conclusion

Nous avons proposé une méthode permettant d'adapter une méthode de tatouage en niveaux de gris vers la couleur. Elle se base sur une approche psychovisuelle du SVH. Grâce à notre modélisation, nous avons pu déterminer les vecteurs directions minimisant la perception des différences de couleur du SVH. L'invisibilité de la marque a pu être validée par une première campagne d'évaluation psychovisuelle réduite mais qui doit être poursuivie. En ce qui concerne la robustesse de la mé-

Approches	Approche constante	Approche adaptative
Votes moyens	4% ± 3%	96% ± 3%

FIGURE 5 – Expériences psychovisuelles de comparaisons d’images marquées. Chaque personne devait décider quelle image était plus dégradée que l’autre (une image tatouée avec l’approche constante et l’autre avec l’approche adaptative). Les paramètres sont DWR = 20dB, ER = 1/2 pour chaque image. Ce tableau montre le pourcentage d’image noté comme moins dégradée pour chaque approche.

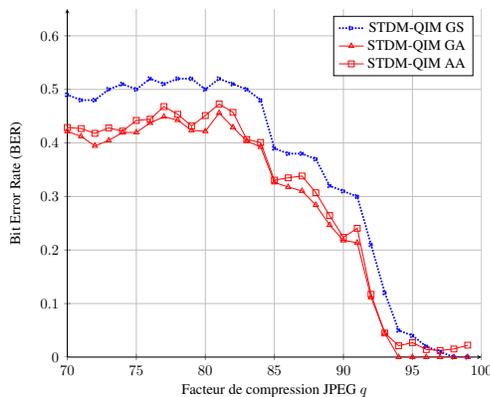


FIGURE 6 – La courbe GS correspond à la méthode STDM-QIM en niveau de gris et les courbes GA et AA à l’adaptation couleur de STDM-QIM avec l’approche constante et adaptative respectivement.

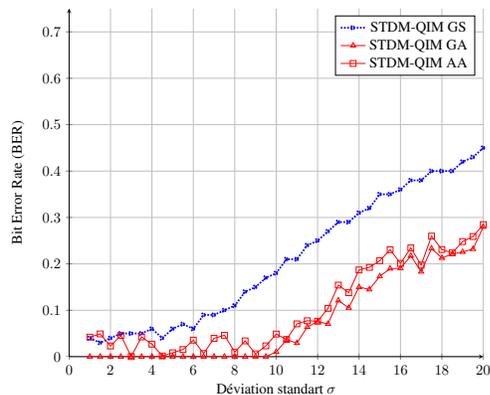


FIGURE 7 – La courbe GS correspond à la méthode STDM-QIM en niveau de gris et les courbes GA et AA à l’adaptation couleur de STDM-QIM avec l’approche constante et adaptative respectivement.

thode, nous avons obtenus une amélioration des taux d’erreur lors de l’adaptation pour le tatouage des images couleur. Grâce à l’approche adaptative, nous pouvons améliorer le compromis invisibilité/robustesse. Pour la suite de ces travaux, nous étudions notre méthode dans des espaces transformés comme les domaines des coefficients DCT ou ondelettes afin de réduire le bruit de quantification ainsi qu’une étude plus détaillée du

système visuel humain abordé dans [2].

Références

- [1] P. Moulin and R. Koetter, “Data-hiding codes,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2083–2126, 2005.
- [2] David Alleysson and David Méary, “Neurogeometry of color vision,” *J Physiol Paris*, vol. 106, no. 5-6, pp. 284–96, Mar. 2012.
- [3] Martin Kutter, Frederic D. Jordan, and Frank Bossen, “Digital signature of color images using amplitude modulation,” 1997, vol. 3022, pp. 518–526.
- [4] Pao-Ta Yu, Hung-Hsu Tsai, and Jyh-Shyan Lin, “Digital watermarking based on neural networks for color images,” *Signal Processing*, vol. 81, no. 3, pp. 663 – 671, 2001, Special section on Digital Signal Processing for Multimedia.
- [5] G. Voyatzis and I. Pitas, “Digital image watermarking using mixing systems,” *Computer & Graphics*, vol. 22, pp. 405–416, 1998.
- [6] Hee-Soo Kim, Ho-Keun Lee, Ho-Young Lee, and Yeong-Ho Ha, “Digital watermarking based on color differences,” 2001, vol. 4314, pp. 10–17.
- [7] Arash Abadpour and Shohreh Kasaei, “Color pca eigenimages and their application to compression and watermarking,” *Image and Vision Computing*, vol. 26, no. 7, pp. 878–890, 2008.
- [8] Gael Chareyron and Alain Trémeau, “Color images watermarking based on minimization of color differences,” in *Int. Workshop on Multimedia Content, Representation, Classification and Security, MRCS’2006*, 2006.
- [9] Channapragada Rama Seshagiri Rao and Munaga V. N. K. Prasad, *Color Image Watermarking Techniques Based on Magic Square and Ridgelets*, pp. 59–74, Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [10] Brian Chen and Gregory W. Wornell, “Quantization index modulation : A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding,” *IEEE TRANS. ON INFORMATION THEORY*, vol. 47, no. 4, pp. 1423–1443, 1999.
- [11] Qiao Li and Ingemar J. Cox, “Using perceptual models to improve fidelity and provide resistance to valumetric scaling for quantization index modulation watermarking,” *Information Forensics and Security, IEEE Transactions on*, vol. 2, no. 2, pp. 127–139, June 2007.
- [12] David Alleysson, *Le traitement du signal chromatique dans la rétine : un modèle de base pour la perception humaine des couleurs*, Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier-Grenoble 1 Sciences et Géographie, March 1999.
- [13] David L. MacAdam, “Visual sensitivities to color differences in daylight*,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 32, no. 5, pp. 247–274, May 1942.