

Tatouage couleur adaptatif fondé sur l'utilisation d'espaces perceptifs uniformes

Adaptive colour image watermarking
based on uniform perceptual spaces

Patrick Bas, Jean-Marc Chassery

Laboratoire des Images et des Signaux, BP. 46, Saint Martin d'Hères, 38402, France

Manuscrit reçu le 15 juin 2004

Résumé et mots clés

Ce papier présente un schéma de tatouage d'images qui utilise des espaces perceptifs uniformes afin de fournir un espace d'insertion couleur qui soit local et adapté. La démarche adoptée a été d'utiliser les espaces uniformes CIE-Lab, CIE-XYZ et la métrique d'acceptabilité CIE-94 pour pouvoir extraire un repère de masquage adapté à la valeur du pixel considéré et des pixels de son voisinage. Le calcul du vecteur de masquage μ_1 est obtenu par calcul différentiel à partir des équations de transformations des espaces uniformes vers l'espace *RVB*. L'insertion du tatouage est ensuite effectuée par quantification des coefficients DCT. Le schéma présenté est finalement évalué en terme d'invisibilité de marquage mais aussi de robustesse par rapport à des traitements classiques d'image que sont la compression JPEG, le filtrage passe-bas et les transformations valométriques. Une comparaison est également effectuée par rapport aux schémas utilisant d'autres composantes de tatouage (Luminance, composante bleue).

Tatouage, couleur, espace perceptif uniforme, quantification.

Abstract and key words

This paper presents a watermarking scheme that uses uniform color spaces to provide a local and adaptive embedding space. The CIE-Lab and CIE-XYZ uniform color space and the CIE-94 metric have been used to extract a masking domain that is adapted to each color pixel value. Calculus of the masking vector μ_1 is given performing a differential calculus that relies on relations between uniform color spaces and *RGB* space. The embedding of the watermark is after achieved by quantization of DCT coefficients and the whole system is evaluated for different constraints such as invisibility and robustness to JPEG compression, low-pass filtering and valumetric transforms. Finally the presented scheme is compared with other schemes that uses other color components (Luminance or Blue).

Watermarking, color, uniform perceptive spaces, quantization.

1. Introduction

Le tatouage d'images consiste en l'insertion d'une signature devant satisfaire trois contraintes [DP04] :

- sa présence doit être *imperceptible* ;
- sa détection doit être possible même si l'image subit des traitements ne portant pas préjudice à la valeur de l'image, cette contrainte définit la *robustesse* d'un schéma de tatouage ;
- la quantité d'information portée par la signature doit, dans certains types d'applications, être la plus importante possible, cette troisième contrainte est liée à la *capacité* de l'algorithme de tatouage.

Bien sûr, ces trois contraintes sont fortement dépendantes les unes des autres et un schéma de tatouage d'images s'inscrit donc dans un triangle de compromis entre l'imperceptibilité, la robustesse et la capacité. Ainsi, un schéma de tatouage qui est robuste à une très grande variété de traitements ne pourra pas avoir une capacité très importante (les techniques de tatouage pour la protection des droits d'auteurs n'utilisent souvent que 64 bits). À l'inverse, une méthode permettant de cacher plusieurs milliers de bits dans une image de taille standard (moins d'un mega-pixel) ne pourra pas être très robuste.

Les outils pour évaluer ces trois contraintes sont bien différents.

La robustesse d'un schéma de tatouage peut être évaluée en utilisant des algorithmes de benchmark tels que Stirmark [Pet97] qui propose de nombreux traitements. La capacité d'un schéma de tatouage peut être également facilement mesurée à partir de courbes débit/taux d'erreurs binaire pour une distorsion donnée. L'imperceptibilité est cependant une contrainte qui est beaucoup plus difficile à évaluer. Le classique PSNR (Peak Signal to Noise Ratio), basé sur l'erreur quadratique moyenne, est une mesure largement utilisée en compression d'images mais est

très limitée sur le plan perceptuel : à PSNR égale une signature présente dans une image peut être facilement perceptible alors qu'une autre signature sera jugée imperceptible (cf. Figure 2). L'optimisation du critère perceptif est donc un facteur qui permettra d'augmenter la puissance de la signature insérée et ainsi d'obtenir un gain en terme de robustesse ou de capacité.

Dans un tel contexte, l'utilisation des composantes couleur d'une image numérique en tatouage offre plusieurs avantages par rapport à l'utilisation d'images en niveau de gris. D'une part la quantité d'information des images couleur peut être multipliée par trois par rapport à la quantité d'information des images en niveau de gris : la capacité d'insertion d'un schéma de tatouage destiné aux images couleur sera donc augmentée (cf. Figure 1). D'autre part les composantes couleur sont liées à des modèles perceptifs qui sont beaucoup plus riches que les modèles utilisant uniquement l'information de luminance.

Ce papier vise à prendre en compte pleinement le caractère chromatique par l'utilisation des espaces couleur uniformes pour le tatouage d'images. Il se décompose en cinq parties.

- La première a pour objectif de présenter une synthèse des méthodes existantes qui utilisent l'information couleur des images.

- La deuxième partie a pour objectif d'introduire la notion d'espace couleur uniforme (au sens perceptif) et les espaces CIE-Lab, CIE-LUV ou CIE-XYZ sont présentés ainsi que leurs modèles de différence couleur respectifs.

- La troisième partie présente une méthodologie permettant de calculer pour chaque couleur d'une image, le vecteur de masquage μ_1 offrant la meilleure imperceptibilité possible.

- La quatrième partie présente une méthode de tatouage utilisant directement la notion de masquage couleur adaptatif par le biais d'un système de tatouage par quantification de coefficients DCT.

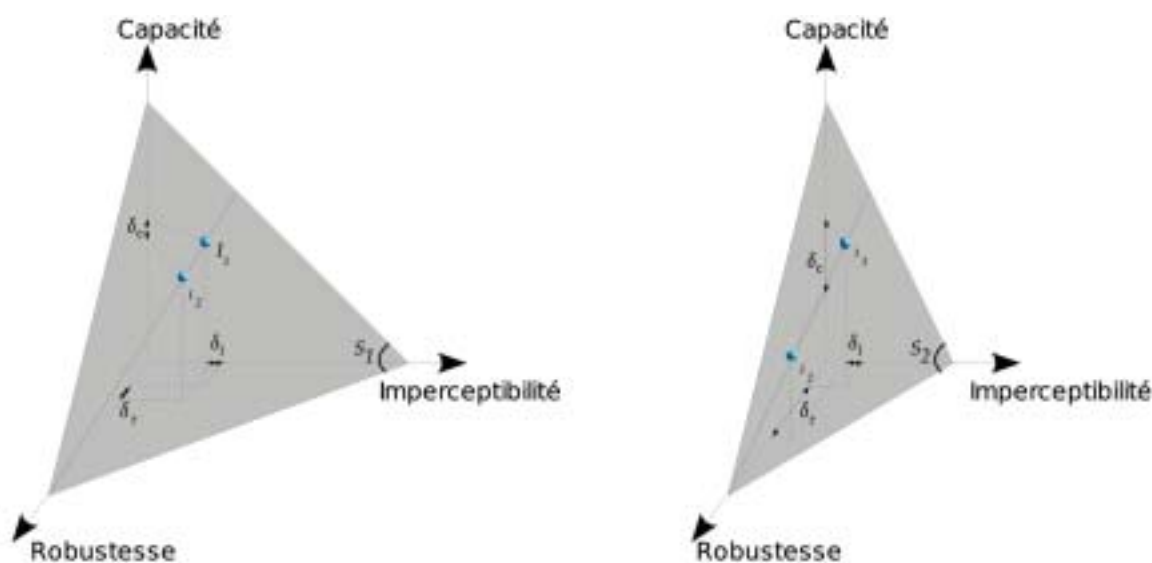


Figure 1. Illustration graphique du triangle des contraintes en tatouage d'images et importance de l'imperceptibilité : une image tatouée I_1 appartient à une surface S_1 telle que l'ajout de robustesse diminuera la capacité et l'imperceptibilité. Si la contrainte d'imperceptibilité est plus faible (surface S_2), une même diminution de perceptibilité δ_r permettra d'obtenir des gains en robustesse et en capacité (δ_r et δ_c) qui sont supérieurs.

- Enfin la dernière partie de ce papier présente une comparaison en terme de visibilité et de robustesse entre le schéma classique et plusieurs autres méthodes d'insertion tatouant soit la luminosité soit d'autres composantes couleur.

2. Méthodes de tatouage d'images couleurs

Le tatouage dédié aux images couleur a reçu moins d'attention de la part de la communauté scientifique en tatouage que le tatouage d'images en niveau de gris. La solution classiquement employée consiste à tatouer directement la luminosité de l'image. Cette solution, si elle est très pratique pour l'implémentation du schéma, n'est pas judicieuse d'un point de vue perceptif car la prise en compte des transformations couleur permet souvent de dégager des espaces de représentations qui sont moins perceptibles.

◊ Une des solutions les plus simples consiste à utiliser le canal bleu comme espace d'insertion car c'est le canal qui est le moins sensible pour la décomposition RVB. Ainsi dans le schéma présenté par Kutter [KJB97], l'insertion s'effectue en modifiant la composante bleue de certains pixels dont les positions sont définies à partir d'une clef secrète.

◊ Il est également possible de prendre en compte les trois composantes couleur plutôt qu'une seule pour augmenter l'espace d'insertion de l'image. Dans le schéma présenté par Piva [PBBC99], la puissance de la signature dépend de la réponse de l'oeil humain aux différentes longueurs d'onde. Ainsi l'amplitude de la signature est environ 10 fois plus importante sur la composante bleue α_B que sur la composante verte α_V et 5 fois plus importante sur la composante bleue que sur la composante rouge α_R .

$$\begin{cases} \alpha_R/\alpha_V = 1.89 \\ \alpha_B/\alpha_V = 10.48 \end{cases}$$

Dans ce schéma la signature est insérée dans le domaine fréquentiel après une transformation en cosinus discrète et la détection s'effectue par corrélation.

◊ Le schéma de tatouage présenté par Fleet [FH97] est issu de la décomposition CIE-Lab. Les auteurs proposent d'utiliser une extension de la décomposition Lab, appelée S-CIELAB, qui dépend également de la structure locale de l'image. Cette décomposition exploite le fait que la perception des couleurs diffère entre les zones homogènes et les zones texturées.

L'espace S-CIELAB se construit en plusieurs étapes [ZW96]. L'image est tout d'abord transformée dans un espace de couleurs opposées $O_1 O_2 O_3$. Chaque composante de cet espace est ensuite filtrée par un filtre passe-bas gaussien. Une décomposition Lab est ensuite calculée après passage des composantes filtrées dans l'espace XYZ pour obtenir la représentation S-CIE-LAB. Les auteurs s'appuient ensuite sur les différences de couleurs ΔE pour fournir un masque psychovisuel.

L'insertion de la signature s'effectue en ajoutant une grille sinusoidale pondéré par le masque obtenu dans la bande de couleur Jaune/Bleu (O_3). La détection de la signature s'effectue par une détection de pics correspondant à la présence de sinusoides dans le spectre de la composante O_3 .

◊ L'utilisation d'autres espaces de représentation achromatiques a été étudiée par d'autres auteurs [PCFM01][BRC03]. Il en ressort que l'utilisation des composantes IQ de l'espace YIQ ou UV de l'espace YUV est intéressante à plus d'un titre :

- D'une part l'oeil humain est moins sensible aux modifications des informations de chrominance que de luminosité : ce phénomène est par ailleurs exploité en codage de séquence vidéo ou les composantes de chrominance sont souvent sous-échantillonnées par rapport aux informations de luminosité.
- D'autre part la détection de la signature est facilitée car l'énergie contenue dans les composantes de chrominance est bien plus faible que l'énergie contenue dans les composantes de luminosité.

3. Formalisation mathématique du tatouage d'images couleur

3.1. Définition de la robustesse

L'objectif de ces travaux est de trouver un espace d'insertion couleur en trois dimensions permettant d'obtenir le meilleur compromis possible entre d'une part l'imperceptibilité de la signature insérée et d'autre part la robustesse du schéma.

Afin de pouvoir modéliser ces deux contraintes, il est nécessaire de pouvoir définir leurs expressions mathématiques. Comme nous l'avons vu dans l'introduction, la robustesse d'un algorithme peut être définie *a posteriori* après de nombreux tests visant à chercher les limites de l'algorithme face à des traitements divers tels que la compression JPEG, le filtrage passe-bas, l'ajout de bruit, des transformations géométriques, des transformations valométriques... Dans le cadre de ce travail nous avons cependant fait l'hypothèse que la robustesse R n'est fonction uniquement que de la puissance P de la signature ajoutée : $R = f(P)$, $f()$ représentant une fonction croissante. Cette hypothèse peut à première vue paraître restrictive car elle n'est valide que pour des traitements simples ou le tatouage est perturbé par un bruit additif, elle ne prend pas en compte des traitements évolués comme les transformations désynchronisantes ou encore les attaques destinées à enlever le tatouage [DP04]. Cependant cette hypothèse a été utilisée dans plusieurs formalisations théoriques du tatouage [PG03] en l'associant à la théorie du jeu. Il est également important de noter que dans cette étude, nous ne faisons aucune hypothèse sur le schéma de

tatouage proprement dit. Ceci permettra de combiner l'espace d'insertion adaptatif avec différents algorithmes de tatouage, qu'ils soient de nature additive ou substitutive [Bas00].

En utilisant un tel formalisme, une image tatouée I_{w1} à partir d'une image initiale I_o fournira une robustesse égale à une autre image tatouée I_{w2} si l'erreur quadratique entre I_o et I_{w1} est égale à l'erreur quadratique entre I_o et I_{w2} . Cette contrainte, appelée ici C_1 peut alors être définie par :

$$C_1 : \text{Robustesse} = \text{constante} \iff \text{PSNR}_{RVB}(dB) = \text{constante}_{\text{global}} \quad (1)$$

avec

$$\text{PSNR}_{RVB}(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{255^2}{\text{MSE}_{RVB}} \right)$$

$$\text{et } \text{MSE}_{RVB} = \frac{\text{MSE}_R + \text{MSE}_G + \text{MSE}_B}{3}$$

et

$$\text{MSE}_A = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (A_i(i,j) - A_f(i,j))^2$$

où le $PSNR$ représente le rapport signal à bruit de crête, MSE l'erreur quadratique moyenne et NM le nombre de pixels de l'image. La contrainte C_1 s'appliquera sur toute l'image mais nous pouvons également définir une contrainte portant sur chaque pixel de l'image. Dans ce dernier cas, la distance entre deux pixels, l'un appartenant à l'image originale, l'autre à l'image tatouée est également définie en utilisant une norme L^2 . Soit $P_1(R_1, V_1, B_1)$ et $P_2(R_2, V_2, B_2)$ deux pixels définis dans un même espace couleur et leurs différence pour chaque compo-

sante $\Delta R = R_1 - R_2$, $\Delta V = V_1 - V_2$ et $\Delta B = B_1 - B_2$, la contrainte de robustesse de manière locale C_2 est définie par :

$$C_2 : \text{Robustesse} = \text{constante} \iff \Delta R^2 + \Delta V^2 + \Delta B^2 = \text{constante}_{\text{local}} \quad (2)$$

Dans la suite de ces travaux nous utiliserons la contrainte C_2 qui s'adapte à la définition des espaces couleur uniformes.

3.2. Motivations

Une fois la robustesse définie à partir de l'erreur quadratique nous avons cherché également à formuler mathématiquement la notion de perceptibilité. Notre démarche s'est appuyée sur deux propriétés que nous rappelons ici mais ont été corroborées par diverses expériences. Ces propriétés portent sur la dépendance entre d'une part la perceptibilité du tatouage et le choix d'une transformation couleur, et d'autre part entre la perceptibilité du tatouage et la valeur de la couleur de l'image sur lequel le tatouage est inséré.

Propriété 1. La perceptibilité, à robustesse constante, d'un tatouage est dépendante de la transformation couleur choisie.

Cette hypothèse a déjà été employée en tatouage d'images couleur notamment au travers des travaux présentés par Kutter et Piva (cf. section 2). Elle s'explique par la connaissance du système visuel humain et celle de l'anatomie de la rétine de l'œil. Les photorécepteurs rétinien sont divisés en cônes et en bâtonnets. Les cônes sont sensibles à la longueur d'onde de la source lumineuse et transmettent l'information de couleur alors que les bâtonnets transmettent une information sur la luminance de l'image perçue. Les cônes se différencient en trois types qui dépendent de la fréquence maximale de photosensibilité : les

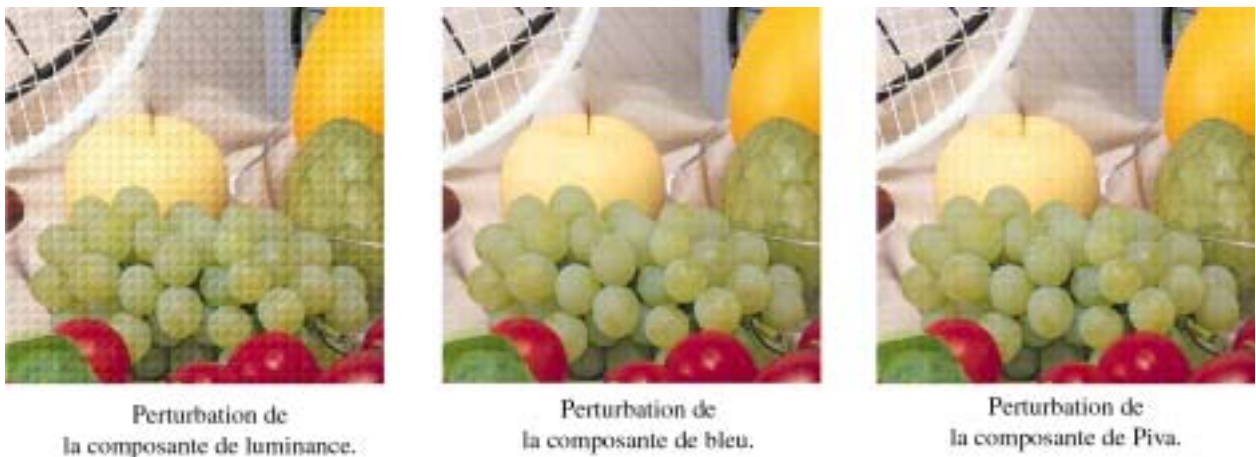


Figure 2. Variation de la sensibilité des perturbations en fonction de la composante perturbée : pour une même erreur (PSNR=29,2 dB), la perturbation ajoutée est d'avantage visible lorsque l'on modifie la composante de luminance plutôt que la composante bleue ou bien la composante proposée par Piva.

cônes S sont plus sensibles au bleu alors que les cônes de type M et L sont plus sensibles respectivement au vert et au rouge. La densité des différents cônes n'est pas la même (les cônes S sont minoritaires par rapport aux cônes L et M dans un rapport de 1:50). Cette dernière propriété est l'une des raisons pour laquelle la perception des perturbations provoquées par le tatouage d'une image n'est pas la même suivant la composante couleur perturbée. Cette propriété est notamment illustrée sur la figure 2 où un signal de puissance constant a été ajouté sur différentes composantes couleurs d'une même image.

Propriété 2. *La perceptibilité, à robustesse constante, d'un tatouage est variable, de plus elle est fonction des composantes couleurs des zones de l'image à tatouer.*

Cette propriété a été depuis longtemps confirmée par les travaux de MacAdam [Mac65] portant sur la détermination des seuils différentiels de chromaticité. Ces travaux ont consisté, pour 25 couleurs différentes, à déterminer les différences de chromaticité juste perceptibles. Les résultats les plus connus de ces travaux sont le calcul des ellipses d'égalisation visuelle appelées ellipses de MacAdam (cf. Figure 3) qui représentent pour chacune des couleurs les variations possibles dans le diagramme de chromaticité xy CIE 1931. Ces résultats soulignent deux propriétés importantes :

- les ellipses sont orientées (ce ne sont pas des cercles) : cela signifie que certaines directions chromatiques entraînent moins de dégradations visuelles que d'autres ;
- l'orientation des ellipses n'est pas constante dans le diagramme de chromaticité : cela signifie que pour une couleur donnée, les axes principaux des ellipses dépendent directement de cette couleur.

La propriété 2 est illustrée par la Figure 4 qui montre la dépendance entre la couleur principale et la couleur de perturbation.

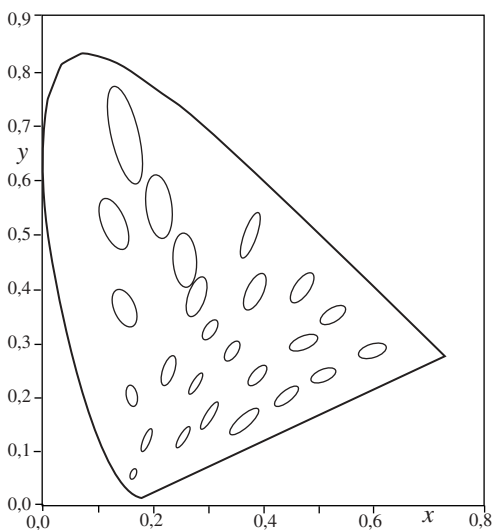


Figure 3. Ellipses de MacAdam.

3.3. Formalisation mathématique de la perceptibilité

Le choix d'une transformation couleur entraînant une distorsion minimale, trouver un repère d'insertion optimal revient à rechercher pour chaque pixel ou bloc de l'image B_i , des coefficients de perturbations Δ_r , Δ_v et Δ_b , tels que les deux contraintes suivantes soient satisfaites :

$$B_i \stackrel{\text{perceptibilité}}{=} B_i + \Delta_r R + \Delta_v V + \Delta_b B \quad (3)$$

et

$$\Delta_r^2 + \Delta_g^2 + \Delta_b^2 = \max \quad (4)$$

La contrainte définie par l'équation (3) indique que le bloc initial B_i est perceptuellement égal au bloc après perturbation des composantes couleur dans l'espace couleur RVB. La contrainte définie par l'équation (4) signifie que la puissance du vecteur de perturbation choisie est maximale, ce qui est équivalent à avoir une robustesse maximale (cf. section 3.1).

3.4. Espaces perceptuels uniformes

Les espaces chromatiques uniformes sont les fruits de l'étude sur les seuils différentiels de couleurs proposés par MacAdam [TFMB04]. Un espace uniforme ABC^* peut être défini par la propriété suivante :

$$(B_i + \Delta_A A + \Delta_B B + \Delta_C C) \ominus B_i = cte \\ \iff \Delta E_{ABC}^2 = \Delta_A^2 + \Delta_B^2 + \Delta_C^2 = R^2 \quad (5)$$

où \ominus représente la différence perceptuelle entre des blocs B d'une image et ΔE_{ABC} est appelée différence couleur du système couleur arbitraire ABC . L'équivalence (5) permet de donner la définition d'un espace couleur uniforme. Dans un tel espace une différence perceptuelle constante entre un bloc d'une couleur B_i et un bloc sur lequel a été ajoutée une composante $(\Delta_A, \Delta_B, \Delta_C)$ est équivalent à ce que la norme du vecteur $(\Delta_A, \Delta_B, \Delta_C)$ soit constante. Dans l'espace uniforme ABC , les pixels qui entraînent une différence perceptuelle d'une même intensité appartiennent donc à la surface d'une sphère de rayon R .

Plusieurs espaces couleur ont été définis par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Les plus utilisés sont les espaces CIE-Lab, CIE-LUV. À cela s'ajoute une métrique associée à l'espace CIE-Lab qui se nomme CIE-94. À chacune de ces métriques correspond une différence couleur appelée respectivement ΔE_{ab}^* , ΔE_{uv}^* et ΔE_{94}^* . Les définitions précises de ces espaces couleur et des différences couleur associées sont présentés dans les annexes mathématiques de cet article. Le tableau 1 résume les différentes formules des différences couleur pour chacun des espaces couleur uniformes et des métriques associées.

* L'utilisation des coordonnées ABC est arbitraire et ne doit pas être associé à un espace couleur éventuellement défini dans la littérature.

4. Calcul du repère perceptuel adaptatif

L'objectif de cette section est de présenter la méthodologie qui nous a permis, à partir de la définition des espaces perceptifs uniformes, de satisfaire les contraintes (3) et (4) pour obtenir une robustesse maximale en garantissant une perceptibilité constante. Des travaux précédents ont également utilisés ce point de départ tout en exploitant la transformée de Fourier Quaternionique [BBC03b][BBC03a].

4.1. Méthodologie

Notre méthodologie a consisté à transposer l'équation des différences couleur d'un espace perceptif uniforme (table 1) vers l'espace Rouge Vert Bleu (RVB) qui est utilisé pour représenter les images.

En première approximation nous acceptons que l'équation des différences couleur $\Delta E_{ABC}^2 = \Delta_A^2 + \Delta_B^2 + \Delta_C^2 = R^2$ puisse être réécrite sous forme différentielle par :

$$\delta E_{ABC}^2 = \delta_A^2 + \delta_B^2 + \delta_C^2 = R^2 \tag{6}$$

et sous forme matricielle par :

$$[\delta_A \ \delta_B \ \delta_C] \ I \ [\delta_A \ \delta_B \ \delta_C]^T = R^2 \tag{7}$$

où I représente une matrice identité de taille 3×3 . L'équation matricielle dans l'espace RVB s'obtient en différenciant les expressions de passage entre l'espace couleur ABC et l'espace RVB . Il est nécessaire pour cela de passer par l'espace intermédiaire XYZ et ainsi de calculer les matrices de passage $P_{ABC \rightarrow XYZ}$ et $P_{XYZ \rightarrow RVB}$. En posant :

$$[\delta_A \ \delta_B \ \delta_C]^T = P_{XYZ \rightarrow ABC} [\delta_X \ \delta_Y \ \delta_Z]^T$$

$$[\delta_X \ \delta_Y \ \delta_Z]^T = P_{RVB \rightarrow XYZ} [\delta_R \ \delta_V \ \delta_B]^T$$

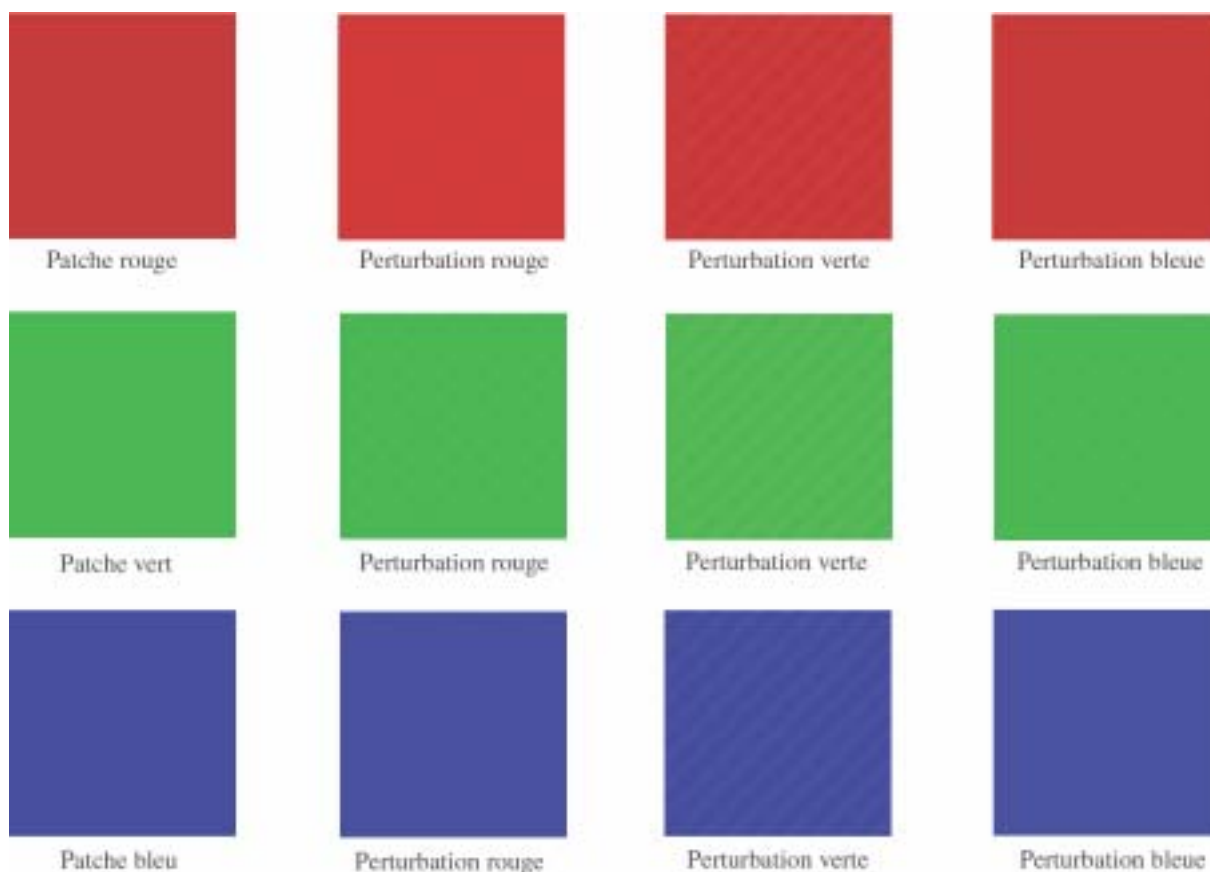


Figure 4. Couleurs masquantes : l'effet des perturbations est différent suivant la nature de la composante couleur principale. Chaque patch de couleur initial n'est composé que d'une composante couleur pure ((255,0,0) pour le rouge, (0,255,0) pour le vert et (0,0,255) pour le bleu). Le patch est ensuite perturbé en modifiant sur certaines zones diagonales de l'image uniquement une seule des trois composantes avec un signal de même amplitude. L'observateur peut constater que la perceptibilité des différentes perturbations n'est pas uniforme suivant la couleur principale.

Tableau 1. Espaces couleur uniformes et formulation des différences couleur ΔE .

Métrique couleur	Equation des différences couleur
$L^*a^*b^*$	$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$
$L^*u^*v^*$	$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta u^{*2} + \Delta v^{*2}}$
CIE-94	$\Delta E_{94}^* = \sqrt{(\Delta L^*/k_L S_L)^2 + (\Delta C_{ab}^*/k_C S_C)^2 + (\Delta H_{ab}^*/k_H S_H)^2}$

l'équation (6) qui représente celle d'une sphère, appelée Γ_{XYZ} se transforme logiquement en l'équation d'une ellipsoïde Γ_{RVB} dans l'espace RVB et a comme formulation matricielle :

$$[\delta_R \ \delta_V \ \delta_B] A^T A [\delta_R \ \delta_V \ \delta_B]^T = R^2 \tag{8}$$

avec $A = P_{XYZ \rightarrow ABC} P_{RVB \rightarrow XYZ}$.

La contrainte (4) (distance maximale entre le pixel initial et le pixel tatoué) revient donc à calculer le point de l'ellipsoïde Γ_{RVB} qui est le plus éloigné de son centre pour obtenir le vecteur $\mu_1 = [\Delta_R \ \Delta_V \ \Delta_B]^T$. Ce point est défini par l'intersection entre l'axe principal de l'ellipsoïde Γ_{RVB} et sa surface (cf. Figure 5). Nous construisons donc le repère perceptuel en calculant la matrice A et en recherchant les axes principaux μ_1 , μ_2 et μ_3 de l'ellipsoïde dans RGB qui correspondent aux vecteurs propres de la matrice $A^T A$ (ils sont orthonormés car $A^T A$ est par définition symétrique). De plus si α_1, α_2 et α_3 représentent les valeurs propres associées aux vecteurs propres μ_1, μ_2 et μ_3 et $\alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3$ alors les scalaires $\Delta_1 = 1/\sqrt{\alpha_1}$, $\Delta_2 = 1/\sqrt{\alpha_2}$ et $\Delta_3 = 1/\sqrt{\alpha_3}$ représentent les excentricités de l'ellipsoïde pour chacun de ses axes principaux. L'ajout d'un

vecteur $\alpha_i \Delta E \mu_i$ sur un vecteur pixel donné entraînera donc une différence couleur égale à ΔE tout en entraînant une robustesse maximale pour $i = 1$. Dans ce cas là $\alpha_1 \mu_1$ entraînera une robustesse maximale car c'est le vecteur appartenant à Γ_{RVB} qui possède la plus importante norme. Afin de ne pas alourdir la présentation de ces travaux, le calcul de la matrice A et des matrices de passages pour les espaces $L^*a^*b^*$, $L^*u^*v^*$ et LCH sont présentés dans les annexes mathématiques en section 8.

La Figure 6 représente l'effet de la dégradation provoquée après l'ajout de la composante couleur $\Delta E(\alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 + \alpha_3 \mu_3)$ lorsque l'on spécifie $\Delta E = 3$ dans le système couleur LCH. L'image (3) représente les valeurs de la différence couleur ΔE entre ces deux images, comme nous pouvons le voir, les valeurs de cette carte sont majoritairement égales à 3.

La Figure 7 illustre le choix adaptatif du vecteur de masquage μ_1 en fonction des couleurs présentes dans l'image initiale (2). Cette image a été obtenue à partir de différentes coupes du cube RVB (cf. image (1)). Les images (3), (4), (5) et (6) représentent les coordonnées du vecteur principal μ'_1 , représentées sur chacun des canaux R, V et B, calculées pour chaque bloc de taille 8×8 de l'image (2). Différentes métriques associées à des

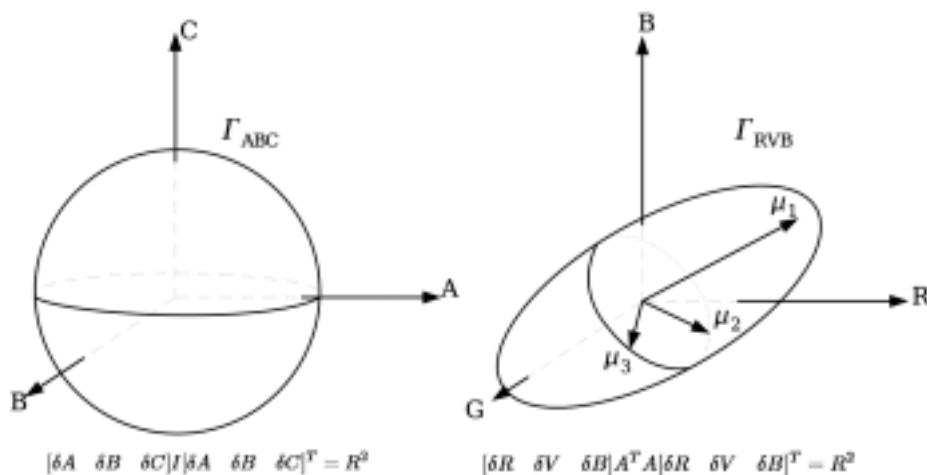


Figure 5. Surface de différence perçue constante dans un espace uniforme arbitraire ABC à gauche et dans l'espace initial RVB à droite. Les vecteurs μ_1, μ_2 et μ_3 sont les axes principaux de l'ellipsoïde. Le vecteur μ_1 entraînera une robustesse maximale.



Figure 6. Delta E CIE-94: (1): image originale, (2) image perturbée par un signal masqué tel que $\Delta E = 3$. (3) Image ΔE obtenue ($\Delta E \leq 2$: noir, $\Delta E = 3$: gris foncé, $\Delta E = 4$: gris clair et $\Delta E > 4$: blanc).

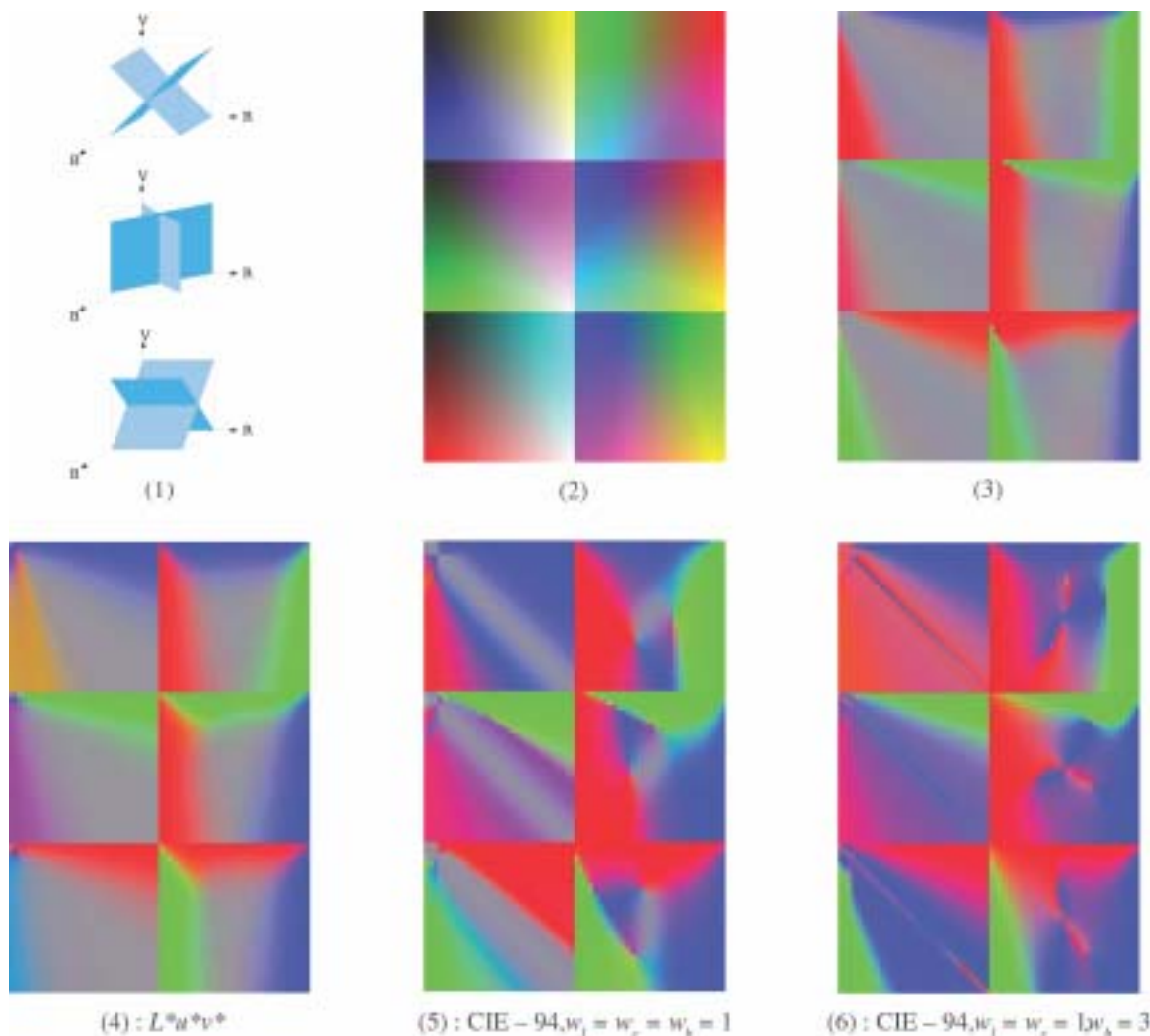


Figure 7. Cartes de masquage: variabilité de l'orientation de vecteur μ'_1 en fonction de la couleur de l'image initiale. (1): coupes sélectionnées du cube RVB. (2): image initiale. (3) valeurs de μ'_1 pour le système $L^*a^*b^*$. (4) valeurs de μ'_1 pour le système $L^*u^*v^*$. (5) et (6) valeurs de μ'_1 pour le système CIE-94 avec pour (5) $w_l = w_c = w_h = 1$ et (6) $w_l = w_c = 1$ et $w_h = 3$.

espaces couleur uniformes ($L^*a^*b^*$, $L^*u^*v^*$ et CIE-94) ont été utilisées. Le vecteur μ'_1 est construit en prenant les valeurs absolues des coordonnées de μ_1 qui ont été multipliés par 255. Les masques calculés pour (5) sont tels que: $w_l = w_c = w_h = 1$, les masques calculés pour (6) sont tels

que: $w_l = w_c = 1$ et $w_h = 3$. Le paramètre w_h permet ainsi d'orienter la direction du vecteur de masquage pour obtenir des changements de teinte plus ou moins importants. Nous pouvons également remarquer que le système de différence ΔE_{CIE-94} permet d'obtenir globalement un vecteur μ_1 qui est plus éloigné

de l'axe des luminances (représenté en gris) que pour les systèmes $L^*a^*b^*$ et $L^*u^*v^*$. La métrique CIE - 94, qui se trouve être la métrique la plus récente parmi ces trois métriques, oriente le masquage vers les axes de chrominances. Le calcul des vecteurs de masquage basé sur le système CIE-94 offre également des orientations de μ_1 qui sont cohérentes avec les observations effectuées sur la figure 2 qui représente les couleurs masquantes (une perturbation verte est d'avantage masquée sur une couleur rouge qu'une perturbation rouge ou bleu alors qu'une perturbation rouge est moins visible sur le bloc vert ou bleu). Ces propriétés sont liées au fait que la métrique CIE-94 est construite à partir d'un espace Luminance/Teinte/Saturation qui favorise la description des informations propres à la couleur.

5. Méthode de tatouage utilisée

L'objectif de cette section est de présenter un exemple d'algorithme de tatouage d'image couleur qui utilise directement les calculs des vecteurs de masquages μ_1 , μ_2 et μ_3 et des puissances de masquages Δ_1 , Δ_2 et Δ_3 associées. Le choix des algorithmes d'insertion et de détection est arbitraire et a surtout pour objectif de présenter une implémentation d'un schéma de tatouage d'image couleur adaptatif et de le comparer avec d'autres versions qui utilisent des représentations plus classiques telles que la luminance ou bien le canal bleu.

5.1. Insertion et détection du message

L'algorithme présenté permet l'insertion d'un message imperceptible en insérant un bit d'information dans chaque bloc 8×8 de l'image couleur. Pour plus de simplicité nous n'utilisons pas de clef secrète mais la sécurité propre à cet algorithme peut être augmentée en sélectionnant les blocs porteurs du mes-

sage à partir d'une telle clef. La robustesse de notre schéma sera évaluée dans la section suivante en calculant le taux d'erreur binaire après dégradation de l'image. Les différentes étapes qui constituent les schémas d'insertion et de détection sont illustrées sur le diagramme de la Figure 8 et s'articulent comme suit :

- L'image initiale est tout d'abord représentée dans les systèmes couleurs RGB, XYZ et Lab puis découpée en blocs de taille $n \times n$.
- Les valeurs moyennes de chaque bloc sont ensuite extraites. Dans un tel type de schéma, il est important d'extraire des composantes couleurs qui restent peu altérées après l'insertion afin de pouvoir extraire les mêmes composantes lors de la phase de détection.
- Les vecteurs de masquage μ_1 , μ_2 et μ_3 et la puissance de masquage Δ_1 sont ensuite calculés à partir de la formule présentée dans la section 4.
- Une transformation orthogonale sur la base (μ_1, μ_2, μ_3) est ensuite appliquée à chaque bloc représenté dans l'espace RVB.
- La transformée en cosinus discrète (TCD) est ensuite appliquée au bloc transformé de la composante associées à μ_1 .
- La signature est ensuite insérée par quantification d'un coefficient C_1 de la transformée [CW01], le pas de quantification étant proportionnel à la puissance de masquage Δ_1 . Le fait de modifier un coefficient AC du bloc DCT permet de ne pas modifier un coefficient DC du bloc DCT permet de ne pas modifier la composante moyenne du bloc après insertion.
- L'image tatouée est ensuite créée après transformation TCD inverse et transformation orthogonale inverse.

La règle d'insertion par quantification est la suivante :

$$S1 \quad b[k] = 1 : \quad C_{w1} = \Delta_1 \mathcal{E} \left(\frac{C_1 + \Delta_1/4}{\Delta_1} \right) - \Delta_1/4$$

$$S1 \quad b[k] = 0 : \quad C_{w1} = \Delta_1 \mathcal{E} \left(\frac{C_1 - \Delta_1/4}{\Delta_1} \right) + \Delta_1/4$$

où $\mathcal{E}(x)$ est une fonction arrondissant x à l'entier le plus proche. La détection du message inséré s'effectue ensuite en appliquant la règle :

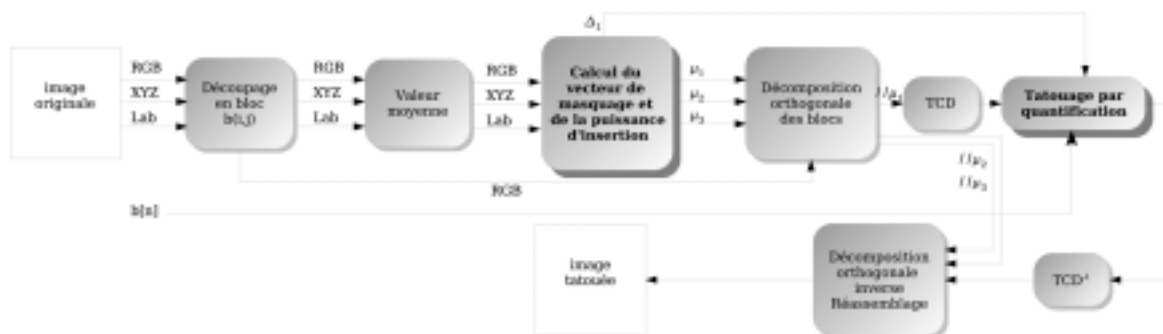


Figure 8. Schéma proposé pour l'insertion d'un message $b[i]$.

Si

$$|C_1 - \Delta_1 \mathcal{E} \left(\frac{C_1 + \Delta_1/4}{\Delta_1} \right) + \Delta_1/4| < |C_1 - \Delta_1 \mathcal{E} \left(\frac{C_1 - \Delta_1/4}{\Delta_1} \right) - \Delta_1/4| \Rightarrow b[k] = 1$$

Sinon

$$\Rightarrow b[k] = 0$$

6. Résultats

L'objectif de cette section est de présenter les différents avantages offerts par l'utilisation d'un espace de couleur adaptatif en terme de visibilité et de robustesse par rapport à la compression JPEG et au filtrage passe bas. La robustesse est évaluée en calculant pour les différents schémas, à PSNR constant, le taux d'erreur binaire au décodage du message inséré. Dans chacun des tests, le schéma perceptif utilise l'espace couleur uniforme défini par CIE-94 avec les coefficients de pondération $w_1 = w_c = w_h = 1$ et l'espace couleur RVB défini par Adobe (les équations de transformations sont définies dans les annexes mathématiques).

6.1. Test de visibilité par rapport aux autres masquages

L'évaluation de la visibilité des différents espaces de tatouage est effectuée en comparant la dégradation visuelle à PSNR constant. Nous avons choisi un PSNR de 30 dB, ce qui correspondant à une dégradation largement visible lorsque l'insertion du message s'effectue sur la seule luminance de l'image. La figure 9 présente une même portion de l'image *peppers* pour différents domaines d'insertion. Comme nous pouvons le voir, la dégradation offerte par le système présenté est beaucoup moins visible que l'insertion dans le domaine de la luminance. Les bandes verticales représentent les dégradations provoquées par une quantification du coefficient fréquentiel codant les variations horizontales. Pour plus de simplicité le message inséré est une succession de 8 bits de valeur 1 puis 8 bits de valeur zéro et ainsi de suite. Les insertions dans l'espace adaptatif et le domaine de Piva offrent des dégradations similaires, même si les dégradations dans le vert sont plus marquées pour notre schéma que pour le schéma de Piva. À l'inverse, la dégradation dans le rouge est moins importante sur notre schéma que pour celui de Piva. La quantification de la composante bleue (image (4)) est la moins visible, mais la robustesse résultante est également beaucoup plus faible (cf. section 6.2). L'image (6) représente l'orientation des vecteurs μ'_1 et illustre le pouvoir d'adaptation du schéma présenté.

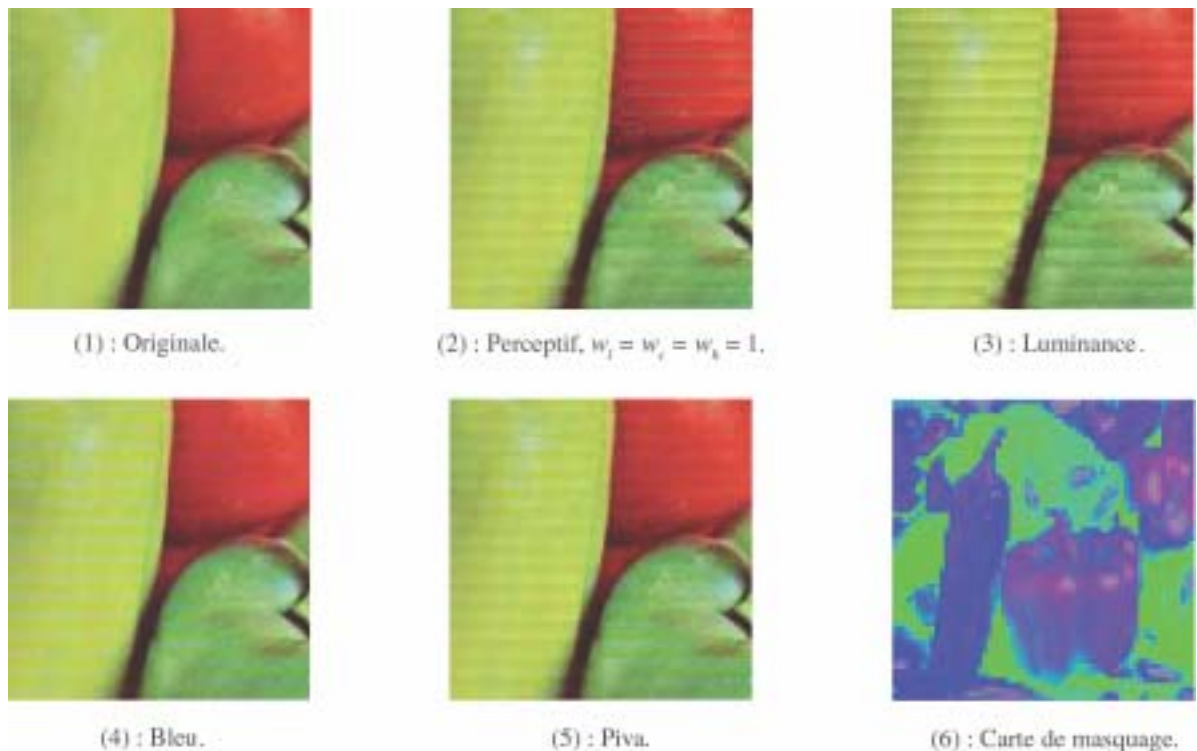


Figure 9. Comparaison de visibilité des différents schéma de tatouage selon l'espace d'insertion couleur utilisé. Dans chacun des cas, le PSNR utilisé est de 30dB. L'image (6) représente l'orientation des vecteurs μ'_1 utilisés pour le schéma perceptif.

6.2. Robustesse par rapport à JPEG

La robustesse propre à chacun des espaces couleurs testés a été évaluée dans un premier temps face à la compression JPEG pour différents facteurs de qualités allant de 10 à 90 %. Dans chacun des cas, le PSNR entre l'image marquée et l'image originale est de 35dB. Les courbes de la figure 10 présentent l'évolution du taux d'erreur binaire calculé après décodage du message présent dans l'image compressée. Le tatouage de la composante de luminance offre une robustesse maximale, la robustesse du schéma adaptatif se situe entre celle du schéma basé sur la luminance et du schéma utilisant l'espace d'insertion proposé par Piva. La robustesse du schéma travaillant sur le canal bleu est beaucoup plus faible. Nous constatons ainsi que l'utilisation d'un repère couleur adapté à l'image permet d'avoir une robustesse importante tout en minimisant la visibilité de la signature (cf. section précédente). La robustesse obtenue est supérieure à celle du même schéma utilisant l'espace d'insertion proposé par

Piva pour une visibilité similaire. Les bonnes performances du schéma utilisant la luminance sont dues au fait que l'algorithme de compression JPEG utilise un pas de quantification plus fin pour la composante de luminance que pour les composantes de chrominance. Ceci permet de préserver au mieux la qualité de la luminance de l'image qui est une information de perception importante. La composante de luminance étant composée des composantes RVB en rapport d'environ 20%, 70% et 10%, c'est la composante bleue qui est la plus sacrifiée par la compression JPEG. La dégradation des composantes de chrominance peut de surcroît être augmentée par le sous échantillonnage éventuel de ces composantes.

6.3. Robustesse par rapport au filtrage passe-bas

Nous avons également évalué la robustesse propre à chaque espace couleur par rapport à un filtrage passe-bas effectué de

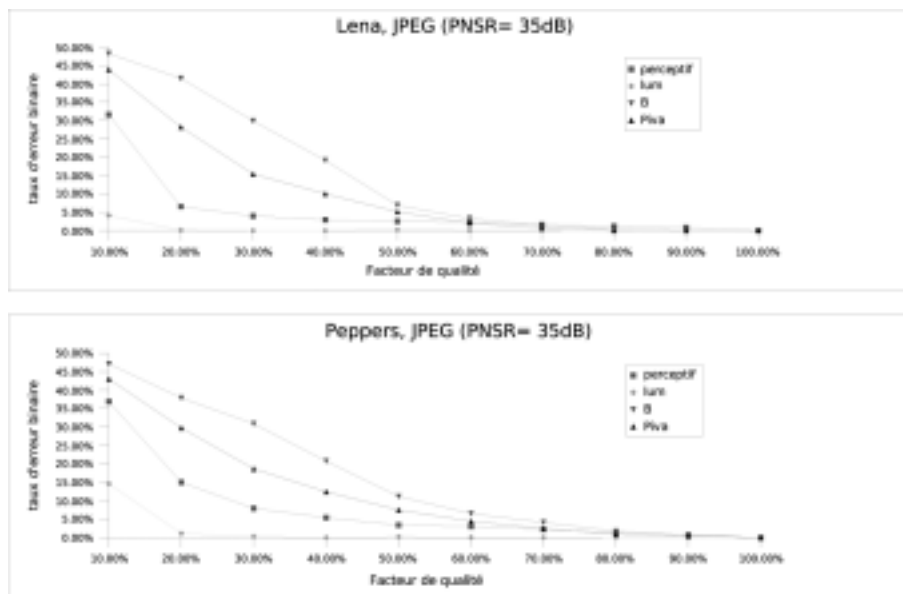


Figure 10. Comparaison de la robustesse du schéma par rapport à JPEG.

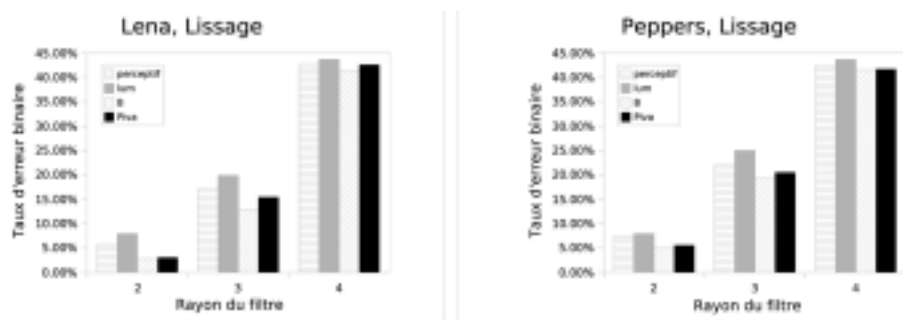


Figure 11. Comparaison de la robustesse du schéma par rapport au filtrage passe-bas.

manière identique sur chacune des composantes R, V et B. Ces résultats sont présentés sur la figure 11 pour les images *lena* et *peppers*. La robustesse du schéma utilisant les composantes perceptuelles est légèrement supérieure à un schéma basé sur la luminance. La robustesse des schémas basés sur la composante bleue et la composante proposée par Piva est plus importante car ces deux schémas privilégient le canal B par rapport aux canaux R et V. Dans ces cas là, il en résulte que la composante finale est moins dégradée. Pour la composante B, les variations spatiales des composantes R et V ne sont pas prises en compte. De manière générale cependant, la composante du schéma présenté ne propose pas une différence de robustesse très importante vis-à-vis des autres schémas.

6.4. Robustesse par rapport aux transformations valométriques

Puisque le schéma de tatouage présenté utilise un espace couleur local adapté à chaque image, il est important d'évaluer la robustesse d'un tel schéma face aux transformations valométriques. Nous avons choisi d'utiliser la transformation Gamma car c'est une transformation qui est utilisée pour permettre l'affichage d'une image sur un écran. Chaque pixel étant modifiée par la transformation Gamma, la valeur de μ_1 est donc modifiée en conséquence et le vecteur μ_1 extrait lors de la détection ne sera plus colinéaire au vecteur initial. L'angle entre ces deux vecteurs sera d'autant plus important que le facteur Gamma est éloigné de 1. La figure 12 illustre le comportement du schéma présenté pour différentes valeurs de Gamma comprises entre 0.5 et 1.5 (l'image étant inchangée pour gamma=1). Comme nous pouvons le voir, la robustesse du schéma de tatouage permet d'obtenir des taux d'erreurs assez faibles pour les valeurs proches de 1. Lorsque la distorsion valométrique est trop importante, le taux d'erreur devient significatif.

Transformation Gamma (PSNR = 35dB)

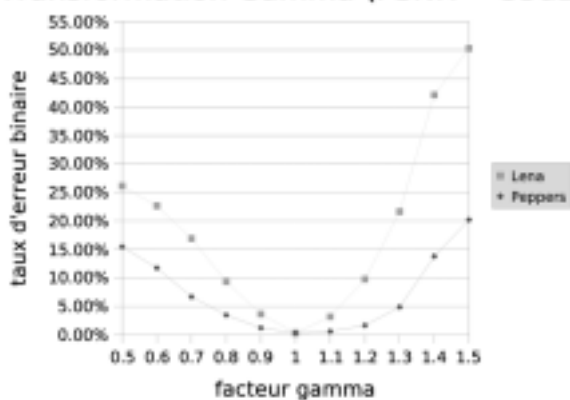


Figure 12. Robustesse par rapport à la transformation Gamma.

7. Conclusion et perspectives

7.1. Conclusion

Nous avons présenté dans ce papier la construction mathématique d'un espace de masquage adaptatif à partir des espaces couleurs perceptifs uniformes, ainsi que son application au tatouage d'images couleur. Face à la compression JPEG, nous avons montré que cet espace offre une robustesse plus importante que les schémas utilisant des espaces couleur tels que ceux de Piva et de Kutter tout en présentant une dégradation visuelle faible. Nous avons également montré que l'insertion d'un message sur la composante de luminance offre une robustesse maximale face à la compression JPEG mais également une visibilité de la signature beaucoup plus importante. Face au filtrage passe-bas, l'utilisation de l'espace couleur perceptif offre une robustesse légèrement inférieure aux espaces de Piva et de Kutter. Enfin, la principale spécificité de ce schéma est sa capacité à offrir un domaine d'insertion adaptatif, ce qui permet d'avoir une puissance de masque plus importante que des schémas tatouant une composante fixe. En contre partie, la robustesse de ce schéma est affectée par des changements valométriques de l'image (changement de luminance ou de chrominance). L'utilisation d'un tel schéma trouvera préférentiellement des applications dans l'insertion de méta données que dans des applications sensibles telles que la protection des droits d'auteurs.

7.2. Vers les modèles d'apparence couleur

Le modèle permettant de construire le vecteur μ_1 trouve également certaines limites. Alors que pour la construction des espaces couleur uniformes le fond est choisi de couleur grise uniforme, dans le cadre du tatouage, le fond (c'est-à-dire la zone périphérique à la perturbation considérée) n'est ni gris ni constant mais se trouve défini à partir de l'image elle-même. Dans le schéma proposé il peut être intéressant de prendre en compte la couleur périphérique de chaque bloc pour calculer l'orientation du vecteur de masquage μ_1 . Dans le travail proposé les paramètres relatifs à la nature de la source lumineuse et des modèles d'adaptation chromatique sont également fixés *a priori*. Aucune adaptation aux conditions réelles de visualisation n'est prise en compte (dans les calculs présentés la lumière est de type lumière naturelle (D65)).

Les modèles d'apparence couleurs (CAM) (CIECAM97s, CIECAM02, iCAM) [Fai98] ont été développés afin de faire face à ces différents problèmes. Ces modèles offrent plusieurs possibilités :

- la prise en compte plus naturelle de l'adaptation chromatique et de l'adaptation spatiale,

- le rôle des couleurs appartenant au fond proche et au fond éloigné,
- l'illumination de objets présents dans l'image,
- une meilleure définition du rôle des composantes luminance, teinte et saturation.

Cependant, le principal inconvénient des modèles d'apparence couleur est que le nombre de paramètres qui interviennent dans le calcul des composantes couleur est beaucoup plus important et rend ainsi la méthodologie adoptée dans ce papier beaucoup plus difficile à appliquer dans cet espace aux dimensions supérieures à trois.

7.3. Décomposition perceptive et codage

Les schémas de compression d'image couleurs utilisent en grande majorité une décomposition luminance/chrominance du type $YCbCr$. Ces schémas proposent généralement de dégrader de manière plus importante les deux composantes de chrominance que la composante de luminance. Le calcul de la composante locale de masquage couleur ouvre alors des perspectives en codage d'image car il peut être utilisé afin d'éliminer ou en de représenter grossièrement les composantes masquées. D'un point de vue pratique, une telle opération peut s'effectuer en adaptant le pas de quantification de chaque composante couleur (quelque soit la représentation utilisée) en fonction du vecteur de masquage trouvé. Cette quantification ne peut par contre n'est que locale et doit être redéfinie pour chaque pixel ou bloc de pixels.

8. Annexes mathématiques

8.1. Définition de l'espace XYZ

L'équation matricielle permettant de passer du système couleur RVB au système de référence XYZ est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} = 100 P'_{RVB \rightarrow XYZ} \begin{bmatrix} (R/255)^\gamma \\ (V/255)^\gamma \\ (B/255)^\gamma \end{bmatrix} \quad (9)$$

où γ représente la pondération Gamma du moniteur et $P'_{RVB \rightarrow XYZ}$ la matrice de passage. Dans nos travaux nous avons choisit l'illuminant D65 ($\gamma = 2.2$ avec un angle d'observation de 2°) ainsi que le système couleur Adobe RVB qui est défini par la matrice de passage :

$$P'_{RVB \rightarrow XYZ} = \begin{bmatrix} 0.576700 & 0.185556 & 0.188212 \\ 0.297361 & 0.627355 & 0.075285 \\ 0.027033 & 0.070688 & 0.991248 \end{bmatrix}$$

8.2. Définition de l'espace $L^*a^*b^*$

L'espace couleur uniforme CIELAB a été défini par la CIE en 1976 de la manière suivante :

$$\begin{cases} L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \\ b^* &= 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \end{cases} \quad (10)$$

Afin de ne pas entraîner des complications de calcul au niveau de la matrice A , la correction de Pauli [Sev96] pour X/X_n , Y/Y_n ou $Z/Z_n < (6/29)^3$ n'a pas été prise en compte. De plus nous avons choisi l'illuminant D65 qui correspond à :

$$\begin{cases} X_n &= 95,04 \\ Y_n &= 100 \\ Z_n &= 108,89 \end{cases}$$

L'équation des différences couleurs s'exprime par :

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (11)$$

8.3. Définition de l'espace $L^*u^*v^*$

L'espace couleur uniforme CIELUV a été défini par la CIE en 1976 de la manière suivante :

$$\begin{cases} L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\ u^* &= 13L^*(u' - u'_n) \\ v^* &= 13L^*(v' - v'_n) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\ v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \end{cases}$$

Pour l'illuminant D65 on prend :

$$\begin{cases} u'_n &= 0.197832 \\ v'_n &= 0.468340 \end{cases}$$

L'équation des différences couleurs s'exprime par :

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta u^{*2} + \Delta v^{*2}} \quad (13)$$

8.4. Formule de différence couleur CIE 1994

Ces formules ont été construites par la CIE en 1994 à partir d'un système Luminance/Chrominance/Teinte $L^*C^*H^*$ défini par :

$$\begin{cases} L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\ C_{ab}^* = \frac{\sqrt{a^{*2} + b^{*2}}}{\sqrt{a^{*2} + b^{*2}}} \\ h_{ab} = \arctan(b^*/a^*) \end{cases} \quad (14)$$

La formule de différence couleur utilise les variations ΔL^* , ΔC^* et ΔH^* où ΔH^* est défini comme étant la variation orthogonale à la variation de chrominance ΔC et non pas par rapport à l'angle Δh qui ne représente pas une distance, soit :

$$\begin{cases} \Delta L^* = L_1^* - L_2^* \\ \Delta C^* = C_1^* - C_2^* \\ \Delta h = h_1 - h_2 \\ \Delta H^* = \text{sgn}(\Delta h) \sqrt{(\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2} \end{cases}$$

Finalement la différence couleur ΔE est définie par :

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{(\Delta L^*/k_L S_L)^2 + (\Delta C_{ab}^*/k_C S_C)^2 + (\Delta H_{ab}^*/k_H S_H)^2} \quad (15)$$

avec $S_L = 1$, $S_C = 1 + 0.045C_{ab}^*$ et $S_H = 1 + 0.015C_{ab}^*$ et k_L , k_C , k_H sont des constantes à définir selon de type d'application envisagée.



8.5. Matrice de passage entre $[\delta X \ \delta Y \ \delta Z]$ et $[\delta R \ \delta V \ \delta B]$

La matrice de passage entre $[\delta X \ \delta Y \ \delta Z]$ et $[\delta R \ \delta V \ \delta B]$ est obtenue différentiant le système (9). On obtient alors :

$$\begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} = P_{RVB \rightarrow XYZ} \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta V \\ \delta B \end{bmatrix} = \frac{100\gamma}{255\gamma} P'_{RVB \rightarrow XYZ} \begin{bmatrix} R^{\gamma-1} & 0 & 0 \\ 0 & V^{\gamma-1} & 0 \\ 0 & 0 & B^{\gamma-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta V \\ \delta B \end{bmatrix}$$

8.6. Matrice de passage entre $[\delta L^* \ \delta a^* \ \delta b^*]$ et $[\delta X \ \delta Y \ \delta Z]$

La matrice de passage entre $[\delta L^* \ \delta a^* \ \delta b^*]$ et $[\delta X \ \delta Y \ \delta Z]$ est obtenue différentiant le système (10). On obtient alors :

$$\begin{bmatrix} \delta L^* \\ \delta a^* \\ \delta b^* \end{bmatrix} = P_{XYZ \rightarrow L^* a^* b^*} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 116Y^{-2/3}Y_n^{-1/3} & 0 \\ 500X^{-2/3}X_n^{-1/3} & -500Y^{-2/3}Y_n^{-1/3} & 0 \\ 0 & 200Y^{-2/3}Y_n^{-1/3} & -200Z^{-2/3}Z_n^{-1/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix}$$

On a finalement $A = P_{XYZ \rightarrow L^* a^* b^*} P_{RVB \rightarrow XYZ}$.

8.7. Matrice de passage entre $[\delta L^* \ \delta u^* \ \delta v^*]$ et $[\delta X \ \delta Y \ \delta Z]$

La matrice de passage entre $[\delta L^* \ \delta u^* \ \delta v^*]$ et $[\delta X \ \delta Y \ \delta Z]$ est obtenue différentiant le système (12). On obtient alors :

$$\begin{bmatrix} \delta L^* \\ \delta u^* \\ \delta v^* \end{bmatrix} = P_{XYZ \rightarrow L^* u^* v^*} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 \\ 13L \left(\frac{4}{D} - \frac{4X}{D^2} \right) & 13(\alpha(u' - u'_n) - 60 \frac{LX}{D^2}) & -156 \frac{LX}{D^2} \\ -117 \frac{LY}{D^2} & 13(\alpha(v' - v'_n) + 9L \left(\frac{1}{D} - 15 \frac{Y}{D^2} \right)) & -351 \frac{LY}{D^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix}$$

avec $\alpha = 16Y^{-2/3}Y_n^{-1/3}/3$ et $D = X + 15Y + 3Z$. On a finalement $A = P_{XYZ \rightarrow L^* u^* v^*} P_{RVB \rightarrow XYZ}$.

8.8. Matrice de passage pour le système CIE-94

La matrice de passage entre $[\delta L^* \ \delta a^* \ \delta b^*]$ et $[\delta L^* \ \delta C \ \delta H]$ peut être obtenue par le calcul géométrique présenté dans la Figure 13. On obtient alors :

$$\begin{bmatrix} \delta L^* \\ \delta C \\ \delta H \end{bmatrix} = P_{L^* a^* b^* \rightarrow LCH} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a/\sqrt{a^2 + b^2} & b/\sqrt{a^2 + b^2} \\ 0 & -b/\sqrt{a^2 + b^2} & a/\sqrt{a^2 + b^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta L^* \\ \delta a^* \\ \delta b^* \end{bmatrix}$$

On a finalement :

$$A = P_{L^* a^* b^* \rightarrow LCH} P_{XYZ \rightarrow L^* a^* b^*} P_{RVB \rightarrow XYZ} = \begin{bmatrix} 1/(k_L S_L) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(k_C S_C) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(k_H S_H) \end{bmatrix}$$

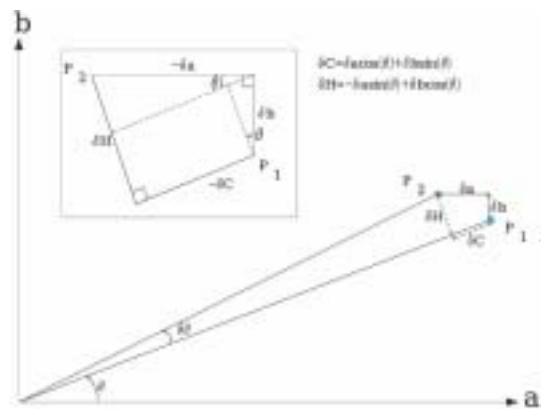


Figure 13. Calcul des différentielles δC et δH à partir de δa et δb .

Références

- [Bas00] P. BAS, *Méthodes de tatouages d'images fondées sur le contenu*, PhD thesis, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2000. manuscrit available on <http://www.lis.inpg.fr/pages/perso/bas/index.htm>.
- [BBC03a] P. BAS, N. LE BIHAN, J.-M. CHASSERY, Color image watermarking using quaternion fourier transform, In *Proceedings of ICASSP*, Hong-Kong, April 2003.
- [BBC03b] P. BAS, N. LE BIHAN, J.-M. CHASSERY, Utilisation de la transformée de fourier quaternionique en tatouage d'images couleur. In *GRETSI'03*, Paris (France), 2003.
- [BRC03] P. BAS, B. ROUE, J.-M. CHASSERY, Tatouage d'images couleur additif: vers la sélection d'un espace d'insertion optimal. In *Coresa03*, Lyon, France, 2003.
- [CW01] B. CHEN, G.-W. WORNELL, Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding, *IEEE Transactions on Information Theory*, 47(4):1423-1443, 2001.
- [DP04] F. DAVOINE, S. PATEUX, *Tatouage de documents audiovisuels numériques*, Lavoisier, éditions hermes, 2004.
- [Fai98] M. FAIRCHILD, *Color Appearance Models*, Addison-Wesley, 1998.
- [FH97] D. FLEET, D. HEEGER, Embedding invisible information in color images, In *IEEE-ICIP'97*, volume 1, pages 532-535, Santa Barbara (Cal) Usa, 1997.
- [KJB97] M. KUTTER, F. JORDAN, F. BOSSEN, Digital signatures of color images using amplitude modulation, In *SPIE, EI97 Proceedings*, pages 518-526, San Jose, California USA, February 1997.
- [Mac65] D.-L. MACADAM, Color measurement and tolerances, *Official Digest*, pages 1487-1531, 1965.
- [PBBC99] A. PIVA, M. BARNI, F. BARTOLINI, V. CAPPELLINI, Exploiting the cross-correlation of rgb-channels for robust watermarking of color images, In *IEEE-ICIP'99*, volume I, pages 306-310, Kobe (Japan), October 1999.
- [PCFM01] A. PARISIS, P. CARRÉ, C. FERNANDEZ-MALOIGNE, Watermarking et couleur: étude de différents espaces de représentation couleur. In *Coresa01*, Dijon, France, 2001.
- [Pet97] F. PETICOLAS, Stirmark 4.0. <http://www.cl.cam.ac.uk/mgk25/stirmark.html>, November 1997.
- [PG03] S. PATEUX, G. LE GUELVUIT, Practical watermarking scheme based on wide spread spectrum and game theory, *Signal Processing: Image Communication*, (18): 283-296, 2003.
- [Sev96] R. SEVE, *Physique de la couleur*, Physique fondamentale et appliquée, Masson, 1996.
- [TFMB04] A. TRÉMEAU, C. FERNANDEZ-MALOIGNE, P. BONTON, *Image Numérique Couleur, de l'acquisition au traitement*. Dunod, science sup, 2004.
- [ZW96] X. M. ZHANG, B.-A. WANDELL, A spatial extension to cielab for digital color image reproduction, *Society of Information Display Symposium Technical Digest*, 27: 731-734, 1996.



Patrick Bas

Patrick Bas a reçu son diplôme d'ingénieur électricien de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) en 1997 et son diplôme de docteur de l'INPG en 2000. Pendant cette période, il fut membre du Laboratoire des Images et des Signaux de Grenoble (LIS), où il a travaillé sur le tatouage d'images fixes. De 2000 à 2001, Patrick Bas fut membre du Laboratoire de Télécommunication et de Télédéttection de l'Université catholique de Louvain en Belgique. Actuellement, Patrick Bas est chargé de recherche CNRS au laboratoire LIS. Ses thèmes de recherche regroupent le tatouage et le codage d'images et de séquences vidéo, ainsi que la création de contenus multimédia augmentés.



Jean-Marc Chassery

Jean-Marc Chassery est directeur de recherche au CNRS. Son domaine d'activités porte sur le développement de modèles géométriques pour la représentation, le codage, la description et l'interprétation des images et des formes. La géométrie discrète (géométrie sur la base de maillages discrets) s'inscrit au côté d'approches fondées sur des techniques de partitionnement non réguliers, adaptatifs et hiérarchiques. Ces modèles trouvent des applications directes en reconstruction surfacique ou volumique, en segmentation spatio-temporelle, en codage d'images et de formes ainsi que dans le domaine de la protection par tatouage par le contenu.

Après avoir dirigé le GDR ISIS (Information, Signal, Images et viSion) de 1996 à 2001, il est directeur du laboratoire LIS (Laboratoire des Images et des Signaux), UMR du CNRS.