

Tatouage perceptuel et adaptatif d'images fixes

Adaptive and perceptual watermarking of still images

par **A. SAADANE, F. AUTRUSSEAU**

Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN), La Chantrerie, BP50609, 44306 Nantes Cedex

Tél: (33) 02-40-68-30-46 Fax: (33) 02-40-68-30-66 email: asaadane@ireste.fr

résumé et mots clés

Cet article présente un nouvel algorithme de tatouage perceptuel et adaptatif. Il est perceptuel parce qu'il exploite une modélisation du comportement du système visuel humain pour déterminer les sites propices au tatouage. La modélisation considérée ici, décompose l'espace de représentation en 17 canaux visuels. Ces derniers se répartissent en un canal basses fréquences non directionnel et trois bandes de fréquences radiales, elles mêmes décomposées en canaux angulaires dont le nombre dépend de la bande radiale considérée. Le tatouage est dit également adaptatif parce qu'il utilise un modèle de perception des erreurs pour calculer la force maximale à appliquer pour que l'intégration du filigrane n'engendre pas de dégradations visibles.

Les performances de cette approche ont été évaluées en termes de transparence du filigrane et de sa robustesse à différentes attaques. Dans le premier cas, des tests d'évaluation menés selon la recommandation 500 du CCIR ont permis de juger en fonction de la force du filigrane, la qualité visuelle des images tatouées par rapport à celle des images originales. Dans le deuxième cas, le calcul du coefficient de corrélation a permis d'analyser l'efficacité du recouvrement du filigrane original face à des attaques comme le filtrage passe-bas, le filtrage median, l'ajout de bruit, la compression JPEG à différents taux, le pseudo-cropping et les attaques géométriques limitées.

tatouage perceptuel, Système Visuel Humain, modèle de visibilité des erreurs, effets de masquage.

abstract and key words

This paper presents a new adaptive and perceptual watermarking algorithm. This algorithm is called perceptual as it uses a model of the human visual system (HVS) to determine the auspicious sites for watermarking. The HVS modelisation considered here is consistent with a decomposition that uses a non directional low pass channel and a set of three band pass radial frequency channels each being decomposed into angular sectors. The watermarking is also called adaptive as it exploits an error visibility model to compute for each image and for each selected site the maximum watermark strength to be applied without inducing visible degradations.

The algorithm performances have been evaluated in terms of watermark invisibility and robustness to different attacks. In the first case, subjective tests, based on CCIR recommendation, have been conducted to assess visual quality of images watermarked with different strengths. In the second case, the correlation coefficient is used to determine the original watermark detection efficiency to attacks such as filtering, noise addition, JPEG compression, pseudo-cropping and limited géométric distorsions.

Perceptual watermarking, Human Visual System, Error Visibility model, masking effects.

1. introduction

Le tatouage d'images a connu un essor considérable dû au développement rapide des nouvelles technologies. Son principe consiste à insérer dans l'image, ou la séquence vidéo, un signal que l'on appellera filigrane. Ce dernier, utilisé dans des applications comme la protection des droits d'auteurs, la protection des copies, l'authentification des données, l'indexation etc. doit être en général invisible pour ne pas altérer la qualité de l'image et, pour certaines applications, suffisamment robuste pour résister aux éventuelles différentes attaques.

La conception d'un schéma de tatouage nécessite la définition de plusieurs points: le choix du filigrane, le domaine de son insertion dans l'image, les localisations de son insertion, sa force et enfin la façon de le détecter ou de l'extraire de l'image. Le filigrane est en général choisi comme un bruit blanc [1], une séquence pseudo aléatoire de densité de probabilité gaussienne [2], uniforme ou bipolaire [3][4].

L'insertion du filigrane est une addition [5][6][1], ou une addition adaptative [7]. Cette addition peut avoir lieu dans le domaine spatial (en modifiant les bits peu significatifs) en des emplacements choisis par l'utilisateur [8][9][1], dans le domaine de Fourier [10], dans le domaine DCT (par bloc ou sur l'image entière) [11][12][13][14][15], dans le domaine ondelettes [16][3][17], dans le domaine fractale [18] et dans d'autres domaines comme Hadamard, Fourier Mellin et Radon.

Les localisations d'insertion sont généralement choisies par une technique cryptographique à clef soit secrète soit publique.

La force du filigrane est déterminée à partir du contenu fréquentiel de l'image et de quelques aspects du Système Visuel Humain (SVH) [19][20][21][22].

La détection du filigrane utilise en général la théorie classique de détection. Le coefficient de corrélation [2][23][24] est calculé entre le filigrane original et le filigrane extrait. Si le coefficient de corrélation dépasse un seuil donné, l'image est supposée contenir le filigrane original.

Pour satisfaire les deux contraintes conflictuelles que sont l'invisibilité et la robustesse aux attaques, les schémas de tatouage s'orientent de plus en plus vers l'exploitation des modèles du SVH. C'est dans ce contexte que se situent les travaux décrits dans ce papier. L'objectif est double. Dans un premier temps, on montre comment la sensibilité du SVH aux fréquences spatiales est exploitée pour déterminer les sites propices à l'insertion du filigrane. On montre ensuite comment sont utilisées les capacités de masquage du SVH pour calculer la force maximale du filigrane à appliquer en chaque site retenu. Un algorithme de tatouage est alors proposé pour juger la pertinence du choix de ces sites et des forces associées.

Pour décrire l'algorithme ce travail est organisé comme suit. La deuxième section passera en revue les principaux modèles visuels qui ont été utilisés dans des applications de traitement

d'images comme le codage, et qui peuvent être réutilisés dans le domaine du tatouage. En outre, cette section s'intéressera aux effets de masquage et donnera le modèle le plus utilisé de la variation du seuil de détection d'un stimulus en fonction des caractéristiques du signal masquant. La troisième section précisera d'abord pourquoi il y a nécessité d'une nouvelle approche et décrira ensuite l'algorithme proposé. Cette description inclut la sélection des sites propices au tatouage, le modèle de visibilité des erreurs utilisé pour calculer la force maximale applicable à chaque site, l'insertion et enfin la détection du filigrane. La quatrième section présente les résultats obtenus et discute le comportement de l'algorithme vis à vis des différentes attaques testées.

2. modélisation du SVH

Le tatouage perceptuel utilise les mêmes modèles visuels que ceux qui ont été largement développés dans le cadre du codage d'images. Ces modèles, qui ont montré tout leur intérêt, exploitent d'une part, la sensibilité au contraste du SVH pour déterminer les sites favorables au tatouage. D'autre part, les capacités de masquage du SVH sont utilisées pour calculer les forces maximales à appliquer pour assurer aussi bien la transparence que la robustesse du filigrane à insérer.

2.1. sensibilité au contraste

2.1.1. modélisation mono-canal

Afin de déterminer la sensibilité au contraste du SVH, plusieurs études ont été menées. Le principe général consiste à afficher des stimuli spatiaux, monofréquentiels, monodimensionnels, à variation de luminance donnée par $L(x) = L(1 + c \sin(2\pi fx))$ où L est la luminance de fond et à déterminer la valeur minimale du contraste « c » permettant de détecter la fréquence f . Le contraste obtenu est appelé « contraste seuil » ou « seuil de visibilité ». L'inverse de ce contraste représente la sensibilité visuelle à la fréquence f .

En tâche de détection le premier modèle de la fonction de sensibilité aux contrastes (CSF) a été proposé dans les années 70 par Mannos et Sakrison [25] et s'écrit:

$$CSF(f) = a \left(b + \frac{f}{f_0} \right) \exp \left(-\frac{f}{f_0} \right)^c,$$

a , b , c et f_0 représentent les paramètres du modèle. L'expression $CSF(f) = 2.6 (0.192 + 0.114f) \exp(-0.114f)^{1.1}$

a été utilisée par les auteurs, dans le cadre de l'évaluation de la qualité des images dégradées, pour pondérer le spectre de l'image d'erreur. Bien que cette modélisation soit largement admise, diverses études sont menées pour prendre en compte les différents paramètres expérimentaux. Ainsi la CSF proposée par Barten [26] tient compte de la variation de la luminance de fond L et des conditions d'observation. Cette CSF s'écrit

$$CSF(f, L) = a(L, f, \omega) f \sqrt{1 + 0.06 \exp[b(L)f]} \cdot \exp[-b(L)f],$$

où L représente la luminance de fond et est exprimée en candelas par mètre carré. f représente la fréquence radiale et s'exprime en cycles par degré. Les paramètres du modèle $a(L, f, \omega)$ et $b(L)$ sont donnés par

$$a(L, f, \omega) = \frac{540 (1 + 0.7/L)^{-0.2}}{1 + \frac{12}{\omega (1 + f/3)^2}},$$

$$b(L) = 0.3 (1 + 100/L)^{0.15},$$

l'angle solide ω , exprimé en degrés, est donné par

$$\omega = \frac{180 \sqrt{A}}{\pi D}$$

avec A taille de l'image et D distance d'observation.

Cette CSF a été modifiée [27] pour rendre compte du caractère non isotropique de la sensibilité visuelle :

$$CSF(f, L, \theta) = a(L, f, \omega) f \sqrt{1 + 0.06 \exp[b(L)f]} \cdot \exp[-b(L)f \Gamma(\theta)],$$

avec $\Gamma(\theta) = 1 - 0.079 [\cos(4\theta) - 1]$.

2.1.2. modélisation multi-canal

Bien que souvent utilisée, la modélisation « mono-canal » ne suffit pas toutefois à expliquer le comportement du SVH vis-à-vis de stimuli complexes [28][29]. Il est admis [30] que le SVH utilise pour l'analyse des signaux d'entrée un ensemble de canaux dont chacun est sensible à une orientation et à une fréquence spatiale donnée. Les caractéristiques de ces canaux, séparables dans une représentation polaire, ont fait l'objet de plusieurs études [31][32][33].

Pour ce qui est de la sélectivité radiale, différentes valeurs de largeur de bande existent. Une largeur de bande constante égale à l'octave est donnée dans [34][35] alors que Georgeson et Harris [36] relèvent une valeur de 1.33 octaves. Une bande passante de 2 octaves dépendante de la fréquence spatiale est également donnée dans [37] pour un canal centré sur 8 cycles / degré. Concernant la sélectivité angulaire, celle-ci varie avec la fréquence centrale du canal visuel considéré. Pour les faibles fré-

quences radiales (autour de 1cy/d°), la largeur de bande angulaire mesurée dans [36] est de l'ordre de 50 degrés. Pour les moyennes fréquences radiales (autour de 4 cy/d°), cette largeur de bande varie selon les auteurs entre 35 et 40 degrés [33]. Enfin pour les moyennes-hautes fréquences (8 à 12c cy/d°), la bande passante est d'environ 30 degrés [37][33].

La modélisation en canaux perceptuels considérée ici, largement décrite dans [38], est donnée figure 1. Elle consiste en quatre bandes radiales appelées couronnes. La couronne I (basses fréquences) est non sélective en orientation. Les largeurs de bandes des couronnes II, III et IV sont respectivement de 1.9 octaves, 1.3 octaves et 1 octave. Chacune de ces couronnes est sélective en orientation. Cette sélectivité angulaire dépend de la fréquence spatiale et vaut 45 degrés pour la couronne II et 30 degrés pour les couronnes III et IV.

2.2. masquage

En accord avec la modélisation perceptuelle ci-dessus, les signaux ayant des caractéristiques voisines sont traités par les mêmes canaux visuels et suivent donc le même cheminement de l'œil jusqu'au cortex. Il apparaît en fait que de tels signaux interagissent entre eux et sont soumis à des effets non linéaires. L'effet non linéaire le plus considéré est l'effet de masquage. Ce dernier traduit la variation du seuil de détection d'un stimulus due à la présence d'un signal, qualifié de signal masquant, ayant des caractéristiques voisines et un niveau plus fort. Étudier l'effet de masquage revient donc à modéliser la variation du seuil de détection d'un stimulus en fonction des caractéristiques du signal masquant.

L'effet de masquage a fait l'objet de plusieurs études et différents modèles ont été proposés dans la littérature [39] [40] [41]

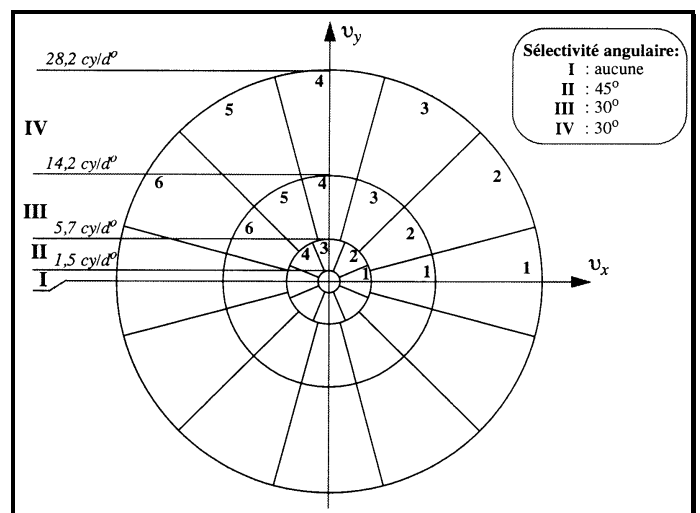


Figure 1. – Modélisation du comportement des parties périphériques du SVH.

[42]. Le modèle largement utilisé [22] [27] [35] traduisant cet effet non linéaire s'écrit lorsque le stimulus et le signal masquant ont les mêmes caractéristiques:

$$C_0^m(f, \theta, L) = C_0(f, \theta, L) \max \left[1, \left| \frac{C_m(f, \theta)}{C_0(f, \theta, L)} \right|^\alpha \right],$$

- $C_0^m(f, \theta, L)$ est le contraste seuil du stimulus de caractéristiques (f, θ) en présence du signal masquant et présenté sur un fond de luminance L .
- $C_0(f, \theta, L) = \frac{1}{CSF(f, \theta, L)}$ est le contraste seuil du stimulus de caractéristiques (f, θ) présenté seul sur un fond de luminance L .
- $C_m(f, \theta)$ est le contraste du signal masquant de mêmes caractéristiques (f, θ) que le stimulus.
- α est un paramètre dépendant de (f, θ) et varie typiquement entre $0.6 \leq \alpha \leq 1.1$.

Le contraste seuil $C_0^m(f, \theta, L)$ varie en fonction de la variation des caractéristiques (f_m, θ_m) du signal masquant. Pour prendre en compte cette dépendance, une fonction de pondération est utilisée et le nouveau modèle s'écrit

$$C_0^m(f, \theta, L) = C_0(f, \theta, L) \max \left[1, \left| k \left(\frac{f_m}{f}, \theta_m - \theta \right) \frac{C_m(f_m, \theta_m, L_m)}{C_0(f, \theta, L)} \right|^\alpha \right],$$

où $k \left(\frac{f_m}{f}, \theta_m - \theta \right)$ est la fonction de pondération modélisée généralement par une gaussienne:

$$k \left(\frac{f_m}{f}, \theta_m - \theta \right) = \exp \left[- \left(\frac{\log_2^2 \left(\frac{f_m}{f} \right)}{\sigma_f^2} + \frac{(\theta_m - \theta)^2}{\sigma_\theta^2} \right) \right].$$

Les paramètres σ_f et σ_θ représentent la largeur de bande radiale et angulaire de la gaussienne et dépendent de la fréquence du stimulus. La largeur de bande radiale, définie à mi hauteur, est de l'ordre de 2.5 octaves à 1 cy/d° et de 1.5 octaves à 16 cy/d° avec une décroissance linéaire [43]. La largeur de bande angulaire est de l'ordre de 30 degrés à 1 cy/d° et de 15 degrés à 16 cy/d° [44].

3. approche proposée

L'exploitation directe de ces modèles en tatouage d'images réelles soulève deux difficultés majeures. La première est liée au fait que les signaux masquants utilisés ci dessus sont des signaux sinusoidaux simples. Pour de tels signaux le contraste

est en général bien défini soit par la formule de Michelson

$$c = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}},$$

soit par la fraction de Weber

$$c = \frac{\Delta L}{L}.$$

Dans le cas de signaux complexes tels que les images réelles, il y a donc lieu « d'adapter » ces effets de masquage.

La deuxième difficulté réside dans le calcul de la variation du contraste seuil d'un stimulus donné. Cette variation n'est fonction que des seules caractéristiques du signal masquant alors qu'elle devrait, en plus, prendre en compte les dégradations induites par le tatouage des signaux ayant des caractéristiques voisines de celle du stimulus en question.

L'approche proposée ici surmonte ces difficultés. Pour ce faire, elle exploite une modélisation du SVH en canaux séparables polairement. Le masquage inter-canaux, quand il existe, est négligeable devant le masquage intra-canal résultant de l'interaction entre signaux appartenant au même canal visuel. Le contraste local à bande limitée, discuté ci-dessous, est utilisé pour caractériser les signaux de chaque canal visuel. Un modèle de masquage donnant la variation du contraste seuil, exprimée en contraste local à bande limitée, est donné en fonction des caractéristiques du canal considéré. Les expériences psychophysiques ayant servi à l'élaboration de ce modèle ont utilisé des images réelles comme signaux tests et ont pris en compte l'effet de cumul lié à la dégradation simultanée des différents contrastes.

3.1. description de l'algorithme

La figure 2 donne le schéma bloc de l'algorithme proposé.

Deux traitements préliminaires sont effectués sur l'image originale $I^0(m, n)$ exprimée en niveaux de gris. Le premier consiste en une transformation permettant de passer de l'image en niveaux de gris, perceptuellement sans signification, à l'image des luminances affichées. Cette transformation correspond à la fonction Gamma de l'écran utilisé. Le deuxième traitement transforme les luminances objectives affichées par l'écran en luminances subjectives $L^0(m, n)$ perçues par l'observateur.

La sélection des sites propices au tatouage est effectuée sur l'image des luminances ainsi obtenues. Cette sélection, décrite § 3.1.1, exploite la décomposition en canaux perceptuels (DCP) de la figure 1.

Pour chacun des sites retenus un modèle de visibilité des erreurs, discuté § 3.1.2, permet de déterminer la force maximale $\Delta L_{i,j}^0(m, n)$ au delà de laquelle le filigrane inséré engendre des dégradations visibles. Cette force maximale est ensuite utilisée pour pondérer le filigrane avant son insertion (§ 3.1.3). Après reconstruction, les transformées non linéaires inverses permettent de calculer l'image tatouée en niveaux de gris.

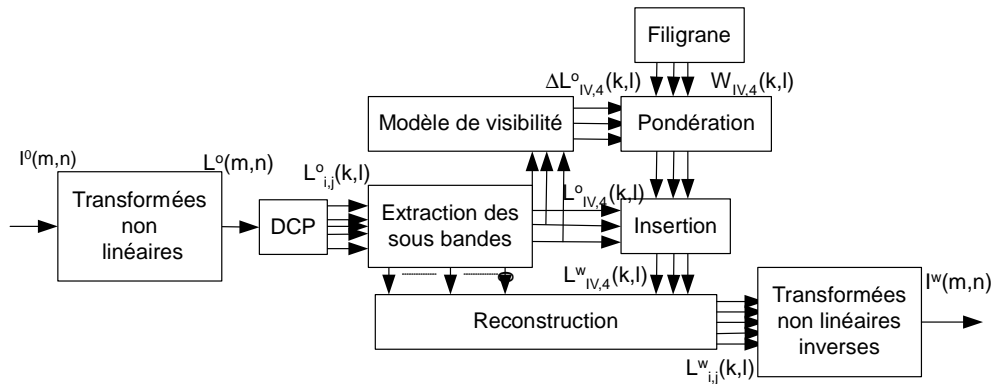


Figure 2. – Schéma bloc général de l'algorithme de tatouage.

3.1.1. sélection des sites

La sélection des sites exploite la décomposition en canaux perceptuels du SVH donnée figure 1. Cette décomposition établie à partir de tests psychophysiques menés au laboratoire, utilise 4 bandes radiales appelées couronnes. La couronne I (basses fréquences) est non sélective en orientation. Les largeurs de bande des couronnes II, III et IV, en accord avec les résultats bibliographiques, sont respectivement de 1.9 octaves, 1.3 octaves et 1 octave. Chacune de ces couronnes est sélective en orientation. Cette sélectivité angulaire dépend de la fréquence spatiale et vaut 45 degrés pour la couronne II et 30 degrés pour les couronnes III et IV.

Le choix des sous-bandes propices au tatouage est conditionné par le compromis invisibilité-robustesse. Alors que la modification des seules basses fréquences spatiales engendre en général des dégradations facilement perceptibles, celle des hautes fréquences spatiales génère un tatouage qui reste non robuste puisqu'un simple filtrage passe bas permet de l'éliminer. Pour tirer avantage de tout le contenu de l'image et satisfaire le critère invisibilité-robustesse, nous pensons qu'il est nécessaire de retenir des sites dans chacune des couronnes II, III et IV. Pour une couronne donnée plusieurs orientations sont alors offertes. Dans ce papier nous avons retenu les sites des sous bandes II-2 (couronne II orientation 2), III,3 (couronne III orientation 3) et IV,4 (couronne IV orientation 4). Ce choix, fait ici *a priori* pour alléger l'algorithme, peut également se faire en fonction du contenu de l'image.

Une fois choisies, les sous bandes sont extraites moyennant l'utilisation des filtres cortex. L'avantage de ces filtres, largement décrits dans [35], réside dans le fait que leur réponse impulsionnelle, tout comme le champ réceptif de la plupart des cellules du Cortex visuel humain, ressemble à une fonction de Gabor 2-D. Ces filtres sont le résultat du produit entre des filtres qui définissent la sélectivité radiale (appelés filtres Dom) et de filtres qui caractérisent la sélectivité angulaire (appelés filtres Fan).

Filtres Dom Les filtres *Dom* sont engendrés par une simple différence entre deux filtres « Mesa » d'indices consécutifs (et donc de fréquence de coupe radiale différente)

$$Dom_i(u_x, v_y) = M_{i-1}(u_x, v_y) - M_i(u_x, v_y)$$

où u_x et v_y représentent les fréquences spatiales. Le filtre Mesa $M_i(u_x, v_y)$ d'indice i est généré à partir du filtre Mesa $M_0(u_x, v_y)$ d'indice 0. Ce dernier est donné par

$$M_0(u_x, v_y) = \left(\frac{\gamma}{f_0}\right)^2 \exp\left[-\pi\left(\omega\frac{\gamma}{f_0}\right)^2\right] \otimes \Pi\left(\frac{\omega}{2f_0}\right)$$

avec $\omega^2 = u_x^2 + v_y^2$, \otimes est le produit de convolution. $\Pi\left(\frac{\omega}{2f_0}\right)$ est la fonction porte 2-D à symétrie circulaire, centrée en zéro et de rayon f_0 . γ est un paramètre de raideur de l'atténuation, lié à l'écart-type σ_0 de la gaussienne par

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{f_0}{\gamma}$$

Le filtre Mesa d'indice i s'écrit donc

$$M_i(u_x, v_y) = M_0\left(\left(\prod_{j=1}^{i-1} s_j\right) u_x, \left(\prod_{j=1}^{i-1} s_j\right) v_y\right)$$

où s est un facteur d'échelle.

Un ensemble de K filtres Mesa peut donc être généré à partir du seul filtre Mesa d'ordre 0 en réduisant à chaque fois la fréquence de coupe du filtre obtenu d'un facteur s .

Filtres Fan L'évolution du gain de ces filtres selon les directions angulaires est également décrite par l'action d'un flou gaussien sur un filtre angulaire idéal. Selon la direction horizontale cette évolution est donnée par

$$M'_0(u_x, v_y) = H(v_y) \otimes \gamma_b \exp(-\pi\gamma_b^2 v_y^2)$$

où

– $H(v_y)$ est le filtre « échelon » qui sépare le domaine fréquentiel en deux sous domaines de gain unité pour l'un et nul pour l'autre.

– γ_b est un nouveau paramètre de raideur.

Compte tenu que le filtre échelon n'a pas de variation selon l'axe u_x , la convolution peut s'écrire dans ce cas

$$M'_0(u_x, v_y) = \int_{-\infty}^v \gamma_b \exp(-\pi \gamma_b^2 \omega^2) d\omega = F(\gamma_b, v_y)$$

L'expression du filtre échelon ayant une orientation θ est alors

$$M'_\theta(u_x, v_y) = F(\gamma_b, (v_y \cos \theta - u_x \sin \theta))$$

Le filtre *Fan* correspondant à la $k^{\text{ème}}$ direction est finalement donné par

$$Fan_k(u_x, v_y) = M'_{\theta_k}(u_x, v_y) - M'_{\theta_{k+1}}(u_x, v_y)$$

3.1.2. détermination des forces

L'étape suivante consiste à déterminer pour chaque sous-bande choisie de fréquence radiale i et d'orientation j (sous-bande (i, j)) le contraste seuil $\Delta C_{i,j}$ au delà duquel les dégradations générées par le processus de tatouage deviennent visibles. Ce contraste seuil est donné par un modèle de visibilité des dégradations [45]. Ce dernier est établi à partir des résultats d'un ensemble de tests psychophysiques qui ont été menés pour déterminer le seuil de visibilité de dégradations lorsque l'effet de masquage intra-canal seul (interactions entre signaux appartenant à une même sous bande) est pris en compte. Fonction des caractéristiques locales, ce modèle s'écrit

$$\Delta C_{i,j} = \frac{E_{i,j}}{L_0} \left(\frac{\Delta f_i}{f_{O,i}} \right)^{k_i}$$

où $\Delta C_{i,j}$ est le contraste seuil de la sous-bande (i, j) ,

$E_{i,j}$ est l'énergie de la sous bande (i, j) ,

L_0 est la luminance de l'écran utilisée pendant les tests,

Δf_i est la largeur de bande radiale i ,

$f_{O,i}$ est la fréquence centrale de la sous-bande i ,

et k_i est une constante qui dépend de la sous-bande i .

Des images réelles ont servi de signaux tests pour établir ce modèle. Pour caractériser ces images, le contraste local à bande limitée a été utilisé. Ce dernier est d'une part local pour exprimer le fait que la sensibilité d'un observateur aux changements de luminance varie avec la luminance moyenne locale. Il est d'autre part à bande limitée car la perception des dégradations dépend directement de leur localisation spectrale. Ce contraste est défini par

$$c_{i,j}(m, n) = \frac{L_{i,j}(m, n)}{\sum_{k=0}^{i-1} \sum_{l=0}^{card(l)} L_{k,l}^i(m, n)}$$

où $L_{i,j}(m, n)$ et $c_{i,j}(m, n)$ représentent respectivement la luminance et le contraste au point (m, n) de la sous-bande (i, j) et $card(l)$ est le nombre de secteurs angulaires dans la $k^{\text{ème}}$ couronne.

Le dénominateur représentant en fait la luminance moyenne locale correspondante à tous les canaux de support spectral inférieur à celui du $i^{\text{ème}}$ canal, l'expression du contraste peut donc se mettre sous la forme

$$c_{i,j}(m, n) = \frac{L_{i,j}(m, n)}{\overline{L_{i,j}}(m, n)}$$

où $\overline{L_{i,j}}(m, n)$ est la luminance moyenne locale au point (m, n) ; la localité étant relative à la sous bande radiale i .

La variation maximale $\Delta L_{i,j}(m, n)$ (ou force maximale) que l'on peut s'autoriser sur la luminance en chaque sous-bande (i, j) et en chaque site (m, n) avant que les dégradations deviennent visibles peut être donnée en première approximation par

$$\Delta L_{i,j}(m, n) = \Delta C_{i,j} \overline{L_{i,j}}(m, n).$$

Cette variation, fonction de la luminance moyenne locale, permet donc d'adapter la force du filigrane aux caractéristiques locales du site considéré.

3.1.3. insertion

Rappelons que les forces maximales $\Delta L_{i,j}(m, n)$ qui viennent d'être déterminées pour chaque sous-bande (i, j) et en chaque point (m, n) dépendent d'une part de la sensibilité du SVH aux fréquences spatiales et d'autre part du contenu de l'image et des effets de masquage que ce contenu peut engendrer sur un contraste spatialement localisé et spectralement limité. L'insertion du filigrane, qui se fait ici dans le domaine spatial sur des sites qui ont été sélectionnés fréquemment, s'écrit

$$L_{i,j}^W(m, n) = \begin{cases} L_{i,j}^0(m, n) + \Delta L_{i,j}(m, n) W_{i,j}(m, n) & \text{si } |L_{i,j}^0(m, n)| > \Delta L_{i,j}(m, n) \\ L_{i,j}^0(m, n) & \text{sinon} \end{cases}$$

où $L_{i,j}^W(m, n)$ représente la luminance tatouée de la sous-bande (i, j) au point (m, n) , $L_{i,j}^0(m, n)$ est la luminance originale de la sous-bande (i, j) au point (m, n) , $\Delta L_{i,j}(m, n)$ est la force maximale au point (m, n) de la sous-bande (i, j) et $W_{i,j}(m, n)$ est une séquence pseudo aléatoire de distribution normale, de valeur moyenne nulle et de variance unitaire correspondant à la sous bande (i, j) .

Ainsi défini, le processus d'insertion peut générer des valeurs supérieures à la force maximale $\Delta L_{i,j}(m, n)$ autorisée. Ces dépassements restent toutefois rares et dans tous les cas n'occasionnent que des dégradations locales qui restent non gênantes. Nous noterons enfin que l'insertion qui s'effectue ici dans le domaine spatial peut également se faire dans le domaine fréquentiel en calculant au préalable les images transformées $\Delta L_{i,j}(u, v)$ des images forces $\Delta L_{i,j}(m, n)$.

3.2. détection et choix du seuil

Le processus de vérification du filigrane utilise la théorie classique de détection et ne requiert pas l'image originale. Le coefficient de corrélation entre le filigrane original $W_{i,j}(m,n)$ et l'image à tester $L_{i,j}^t(m,n)$ est calculé pour chaque sous-bande (i,j) selon

$$\rho_{i,j} = \frac{W_{i,j} \cdot L_{i,j}^t}{\sqrt{W_{i,j} \cdot W_{i,j}} \sqrt{L_{i,j}^t \cdot L_{i,j}^t}}$$

où $W_{i,j} \cdot L_{i,j}^t$ représente le produit scalaire.

Le coefficient de corrélation retenu pour le test statistique final est le coefficient maximum tel que

$$\rho = \max_{i,j} \{ \rho_{i,j} \} .$$

L'évaluation d'un coefficient de corrélation par sous-bande permet d'accroître la robustesse de l'algorithme. En effet, un cropping par exemple altérera davantage les zones à large support spatial (basses fréquences) et ne dégradera que le coefficient de corrélation relatif à ces zones. De même, un filtrage passe bas n'affectera que les coefficients de corrélation correspondant aux hautes fréquences.

La détection du filigrane utilise le test d'hypothèses

H_0 : L'image à tester ne contient pas le filigrane original

H_1 : l'image à tester contient le filigrane original.

On notera que l'hypothèse H_0 inclut également le cas où l'image à tester contient un filigrane qui est différent et indépendant du filigrane original. Le théorème de la limite centrale permet de considérer le coefficient de corrélation comme une variable aléatoire de distribution normale. Le calcul de la valeur moyenne de ce coefficient de corrélation, dans le cas d'un filigrane original $W_{i,j}(m,n)$ indépendant de l'image originale, de distribution normale, de valeur moyenne nulle et de variance unitaire, donne

$$E[\rho_{i,j}] = 0 \quad \text{dans le cas } H_0$$

$$E[\rho_{i,j}] = \frac{E[\Delta L_{i,j}^t(m,n)]}{\sqrt{W_{i,j} \cdot W_{i,j}} \sqrt{L_{i,j}^t \cdot L_{i,j}^t}} \quad \text{dans le cas } H_1$$

Ainsi lorsque cette valeur moyenne est différente de zéro, le filigrane peut être considéré présent dans l'image à tester si $\rho > T$ où T est choisi pour minimiser la probabilité de fausses alarmes (ou fausses détections positives) définie par

$$P_{fa} = \text{Prob}(\rho > T \text{ sachant } H_0) .$$

soit

$$P_{fa} = \text{Prob}(\rho > T \text{ sachant } H_0) = 1 - \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{T}{\sqrt{2}\sigma_\rho} \right) \right] \\ = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{T}{\sqrt{2}\sigma_\rho} \right) .$$

L'estimation de P_{fa} nécessite le calcul de la variance σ_ρ^2 de ρ sachant l'hypothèse H_0 . Le tableau 1 donne la probabilité de fausses alarmes en fonction de T . La variance σ_ρ^2 est calculée sur l'image à tester et est donnée par

$$\sigma_\rho^2 = \frac{E[L_{i,j}^{t^2}(m,n)]}{(W_{i,j} \cdot W_{i,j})(L_{i,j}^t \cdot L_{i,j}^t)} .$$

Dans ce qui suit, le seuil, qui est donc adaptatif à l'image à tester, a été fixé pour avoir une probabilité de fausses alarmes $P_{fa} \leq 10^{-8}$.

tableau 1. – Probabilité de fausses alarmes.

Seuil T	P_{fa}
$\sqrt{2}\sigma_\rho$	0.0786
$2\sqrt{2}\sigma_\rho$	0.0023
$3\sqrt{2}\sigma_\rho$	1.1 E-5
$5\sqrt{2}\sigma_\rho$	7.68 E-13
$7\sqrt{2}\sigma_\rho$	2.09 E-23
$10\sqrt{2}\sigma_\rho$	1.04 E-45

4. résultats

Rappelons que l'objectif de cette section est de montrer l'intérêt d'utiliser les propriétés du SVH dans la conception des algorithmes de tatouage. C'est pourquoi l'accent est essentiellement mis sur l'évaluation de la pertinence du choix des sites à tatouer et des forces associées. Pour ce faire des tests subjectifs sont menés selon les recommandations en vigueur pour juger de la qualité des images tatouées par rapport à celle des images de référence. Des tests de robustesse sont également considérés. Ils se limitent, toutefois, aux attaques les plus utilisées.

4.1. invisibilité

Une batterie de huit images bien connues (Port, Lena, Isa, Fruit, Baboon, Clown, Iba, Tableau) a servi de test. La figure 3 donne des exemples d'images originales et d'images tatouées.

Des tests subjectifs ont été menés selon la recommandation 500 du CCIR [46] pour évaluer la qualité des images tatouées. Avec une procédure à double présentation temporelle, la qualité, variable d'une image à l'autre, a été jugée globalement « excellente » par un ensemble de trois observateurs. Excellente veut dire qu'aucune dégradation n'est visible à une distance d'observation fixée à 4 fois la hauteur de l'écran. Pour voir l'évolution de la qualité des images tatouées en fonction des contrastes seuils $\Delta C_{i,j}$, ces derniers, qui rappellent le sont fonction des caractéristiques de la sous bande, ont été multipliés par un

coefficient k pour chaque sous bande et pour chacune des images de la figure 3. Avec une échelle de qualité à 5 notes (tableau 2), les résultats obtenus sont donnés tableau 3. Ces résultats montrent bien que le choix des contrastes seuils $\Delta C_{i,j}$ est judicieux puisque au delà de ces valeurs la qualité des images commence à se dégrader.

4.2. détection du filigrane sans attaques

La réponse du détecteur à 50 filigranes aléatoires indépendants est donnée figure 4.

L'image test est l'image « port ». Le coefficient de corrélation correspondant à la détection du filigrane original (numéro 20) est largement supérieur aux autres coefficients. Il est également largement supérieur au seuil de détection et laisse supposer que les taux de fausses alarmes du détecteur sont relativement faibles.

Tableau 2. – Échelle d'évaluation subjective 5 notes.

Note	Qualité
5	Excellente
4	Bonne
3	Assez bonne
2	Médiocre
1	Mauvaise

Tableau 3. – Évolution de la qualité des images tatouées en fonction de la force du filigrane.

Coefficient	Bateau	Iba	Lena
1.5	4	4	5
2.5	3	4	3
3.5	3	3	3

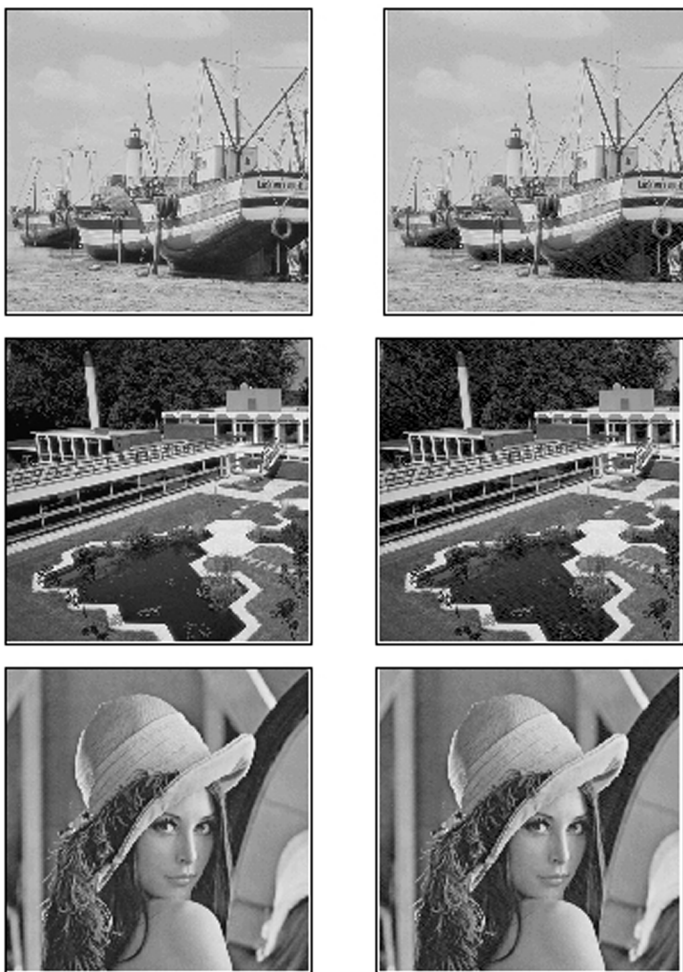


Figure 3. – Exemples d'images tatouées : à gauche les images originales et à droite les images tatouées.

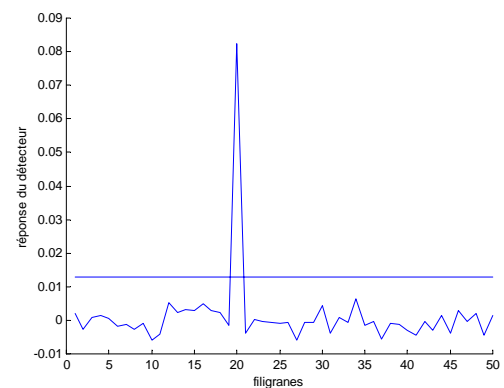


Figure 4. – Réponse du détecteur à 50 filigranes différents.

4.3. robustesse

La robustesse de l'algorithme est jugée face à des attaques usuelles telles que la compression JPEG, le filtrage passe bas, le filtrage médian, l'ajout de bruit, le pseudo-cropping et les transformations géométriques limitées.

4.3.1. JPEG

L'image est souvent compressée pour une meilleure efficacité de stockage ou de transmission. La résistance des algorithmes à des schémas de compression avec pertes est donc nécessaire. La compression JPEG a été utilisée avec des facteurs de qualité allant jusqu'à 20 % (figure 5).

Au delà les images ont une faible qualité et donc peu ou pas d'intérêt commercial. La réponse du détecteur, donnée figure 6, montre que la détection est possible.



Figure 5. – Compression JPEG avec un facteur de qualité de 20 %.

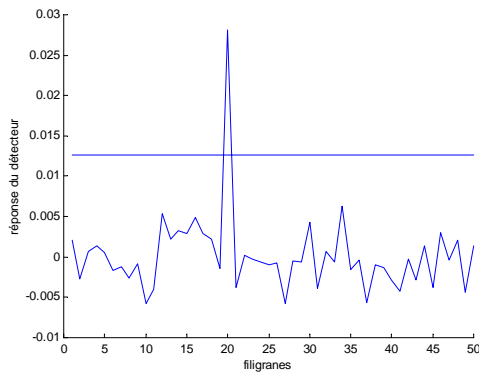


Figure 6. – Réponse du détecteur à une compression JPEG avec un facteur de qualité de 20 %.

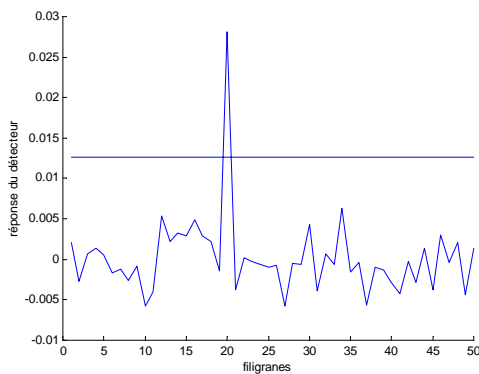


Figure 7. – Réponse du détecteur à un filtrage passe bas 3×3 .

4.3.2. filtres passe-bas et médian

Le filtrage passe-bas, du fait de la simplicité de sa mise en œuvre, est probablement la première attaque, malveillante ou pas, à laquelle est soumis un algorithme de tatouage. De ce fait il est important de tester le comportement de l'algorithme proposé. La figure 8 représente l'image bateau après un filtrage passe bas 3×3 .



Figure 8. – Image « bateau » après un filtrage 3×3 .

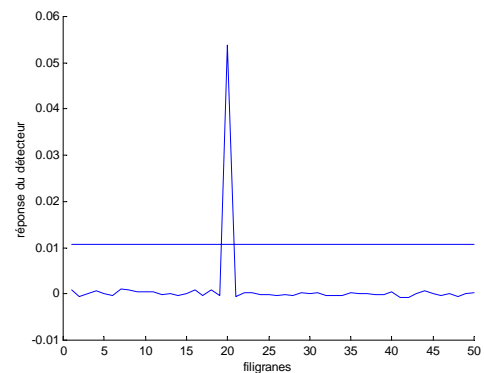


Figure 9. – Réponse du détecteur à un filtrage médian 3×3 .

La réponse du détecteur est donnée figure 7. Bien que les dégradations soient visibles sur l'image filtrée, la détection reste aisée. Ce résultat est toutefois prévisible puisque l'insertion du filigrane se fait dans les trois couronnes couvrant les basses, moyennes et hautes fréquences.

Le comportement de l'algorithme est également testé vis à vis d'un filtrage médian. La réponse du détecteur, figure 9, montre que la détection est possible.

4.3.3. ajout de bruit

La résistance au bruit est la contrainte minimale que tout algorithme de tatouage doit satisfaire. La figure 10 donne la réponse du détecteur à un ajout de bruit gaussien de valeur moyenne nulle et de variance 20. La détection du filigrane reste également possible avec des bruits de variance deux fois plus grande.

4.3.4. transformations géométriques

Pseudo-cropping Dans le cas d'attaques par « cropping » il y'a perte à la fois de la synchronisation et de l'information. Nous nous limiterons à la perte d'information car l'objectif est de

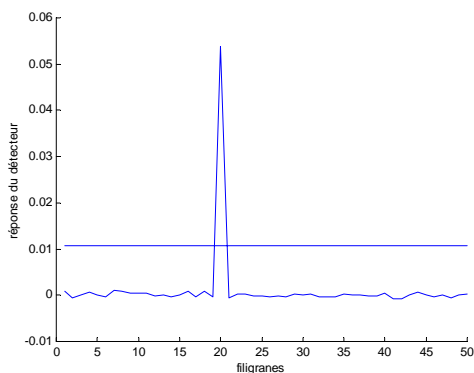


Figure 10. – Réponse du détecteur à un ajout de bruit gaussien (0,20).

montrer que le modèle de masquage permet d'insérer dans toutes les sous-parties de l'image suffisamment d'information pour pouvoir détecter le filigrane. Pour ce faire, la détection du filigrane n'est considérée que dans le cas d'un cropping complété par des valeurs nulles. Un exemple d'une telle attaque est donnée figure 11.

La réponse du détecteur est donnée figure 12. La détection, qui est possible, peut être améliorée en étalant le filigrane sur plusieurs sous bandes.

Transformations géométriques limitées La robustesse de l'algorithme est également considérée dans le cas d'attaques géométriques limitées à une partie de l'image. La figure 13 donne un exemple d'une attaque « effet spirale ». La réponse du détecteur figure 14 montre que la détection est possible. Ceci indique que la force du filigrane est suffisamment adaptée au contenu de l'image pour que les quelques régions de l'image qui restent inchangées suffisent à retrouver le filigrane. Le même comportement de l'algorithme est observé face un « effet flash » qui est une attaque du même genre.

4.4. discussion

Les tests de robustesse effectués se sont limité aux attaques les plus usuelles. Ces attaques constituent néanmoins la base utilisée par différents auteurs pour évaluer les premières performances de leur algorithme. Avec un choix *a priori* des sous-bandes à tatouer et sans aucune optimisation des phases d'insertion et de détection, les résultats obtenus ici restent comparables à ceux donnés dans des études exploitant également les propriétés du SVH [22][47]. Ces deux études, différentes entre elles, diffèrent de celle présentée ici par le modèle du SVH, le modèle de masquage, le domaine d'insertion, le filigrane considéré et les méthodes de détection.

Dans la première étude [22], Delaigle et *al* exploitent les bonnes qualités de corrélation des séquences de longueur maximale (MLS) pour encoder les bits d'un code binaire (filigrane) sur la



Figure 11. – Image « bateau » après un cropping.

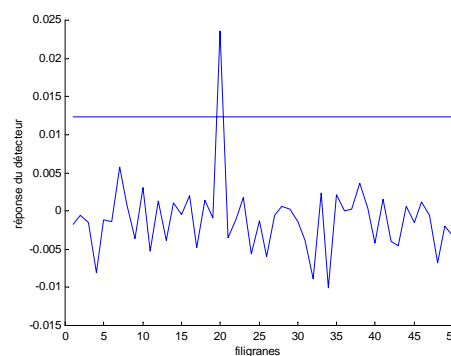


Figure 12. – Réponse du détecteur à un pseudo cropping.



Figure 13. – Exemple d'attaque par effet spirale.

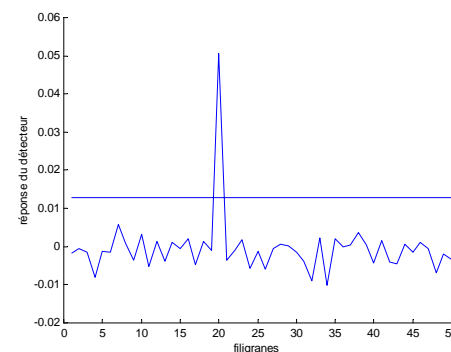


Figure 14. – Réponse du détecteur face à un effet spirale.

phase de MLS. L'intégration du filigrane est additive et s'effectue sur des blocs de 32×8 pixels en niveaux de gris. Cette intégration utilise d'une part, le modèle de masquage de Legge [48] après l'avoir adapté aux images réelles, pour satisfaire le critère d'invisibilité et d'autre part une discrimination de contour et de texture pour contrôler le niveau d'intégration. Le processus de recouvrement utilise le B.E.R (bit error rate).

Sans attaques et sur l'ensemble des images testées ce BER est en moyenne égal à 2.6 %. Dans le cas d'une compression JPEG avec un facteur de qualité supérieur à 20 %, le BER reste inférieur à 5 %. Quand le facteur de qualité est inférieur à 20 % le BER croît fortement. Un comportement analogue du BER est observé dans le cas d'un filtrage passe bas. Le BER croît fortement pour des noyaux de filtres supérieurs à 5×5 . Le cropping n'a pas été testé mais la résistance à l'ajout du bruit et à l'intégration d'un deuxième filigrane ont été considérés.

Dans la deuxième étude [47], Podilchuk *et al* utilisent une DCT calculée sur des blocs 8×8 pour conserver le contrôle local permettant d'intégrer les effets de masquage locaux. L'intégration du filigrane (séquence pseudo aléatoire de valeur moyenne nulle et de variance unitaire) est additive et utilise le modèle de visibilité de Watson [49] pour contrôler le niveau d'intégration. La vérification du filigrane nécessite à la fois l'image originale et le filigrane original et utilise le coefficient de corrélation normalisé. Dans ce cas, les résultats obtenus dans le cas d'une compression JPEG avec un facteur de qualité supérieur à 10 % sont qualifiés de très bons (le coefficient de corrélation normalisé reste en moyenne supérieur à 0.9). Le coefficient de corrélation permet également la détection du filigrane inséré dans le cas d'un cropping (1/4 de l'image originale) suivi d'une compression JPEG avec un facteur de qualité de 20 %. Enfin la détection reste également possible dans le cas d'un ajout d'un bruit blanc suivi d'un cropping et d'une compression JPEG avec un facteur de qualité de 20 %.

5. conclusion

Un nouvel algorithme de tatouage des images fixes a été proposé. L'accent a été essentiellement mis sur l'exploitation des propriétés du système visuel humain (SVH). Ainsi la sélection des sites propices au tatouage exploite une décomposition en canaux perceptuels du SVH. Pour tirer avantage de tout le contenu de l'image et satisfaire le critère d'invisibilité robuste, les sites appartenant aux basses, moyennes et hautes fréquences ont été retenus. La détermination des forces maximales à appliquer à chacun des sites sélectionnés utilise également un modèle perceptuel de visibilité des dégradations. Ce modèle résulte d'un ensemble d'expériences psychophysiques menées en considérant l'effet de masquage intra-canal.

Le filigrane utilisé, dont le contenu spectral est limité à la sous bande considérée, est pondéré par le contraste seuil de la sous

bande et la luminance moyenne locale à cette sous bande. L'insertion du filigrane ainsi pondéré se fait sous bande par sous bande.

La vérification du filigrane utilise la théorie classique de détection et ne requiert pas l'image originale.

L'approche présentée s'est focalisée davantage sur les problèmes de tatouage que sur les applications. Toutefois, les contraintes imposées laissent penser qu'une application comme la protection des droits d'auteurs peut être envisagée. En effet,

- le filigrane original est indépendant de l'image à tester. Il ne peut donc être obtenu par analyse de l'image.
- Seul le propriétaire de l'image (ou une autorité d'enregistrement) possède la clé nécessaire à la génération du filigrane original ou d'un filigrane qui lui est fortement corrélé. D'autres clés, liées par exemple au choix des sous bandes et des sites à tatouer, peuvent également être utilisées pour optimiser la détection.
- Le filigrane utilisé est de valeur moyenne nulle pour s'assurer une valeur moyenne nulle en sortie du corrélateur dans l'hypothèse H_0 .

Les performances de l'algorithme ont été évaluées en termes de qualité des images tatouées et du comportement du coefficient de corrélation vis-à-vis des attaques testées. Nous nous sommes limités à des attaques usuelles comme la compression, le filtrage passe-bas et le cropping et nous n'avons pas cherché à améliorer le coefficient de corrélation. De meilleures performances peuvent être obtenues avec un choix judicieux du filigrane et une optimisation des phases d'insertion et d'extraction. Toutefois, les résultats encourageants obtenus montrent l'intérêt voire la nécessité d'utiliser les propriétés du SVH dans la conception de tout algorithme de tatouage.

6. remerciements

Ce travail a été, en partie, effectué dans le cadre du projet RNRT AQUAMARS « AQUAMARquage des documents audiovisuels pour leur transmission, diffusion, circulation, distribution en toute sécurité sur les réseaux hétérogènes de télécommunication ». Ce projet a regroupé Thalès communications, ENST Paris, LIS Grenoble, IRCCyN Nantes, UTC Compiègne, Eurécom Sophia Antipolis et Netimage Paris.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. Schyndel, A.Z. Tirkel and C.F. Osborne, « A digital watermark », *Proceedings of the International Conference on Image Processing 2*, pp. 86-90, 1994.

- [2] I.J. Cox, J. Kilian, T. Leighton and T. Shamon, « Secure spread spectrum watermarking for images, audio and video », *Proceedings of the International Conference on Image Processing*, pp. 243-246, 1996.
- [3] D. Kundur and D. Hatzinakos, « Digital watermarking using multiresolution wavelet decomposition », *Proceedings of the ICASSP 5*, pp. 2659-2662, Mai 1998.
- [4] M. Kutter, « Watermarking resisting to translation, rotation, and scaling », *Proceedings of SPIE, Multimedia Systems and Applications 3528*, pp. 423-431, November 1998.
- [5] G. Langelaar, R. Langendijk and J. Biemond, « Watermarking by DCT coefficient removal : Statistical approach to optimal parameter settings », *Proc. SPIE IST/SPIE's 11th Annu., Symp., Electronic Imaging : Security and Watermarking of multimedia contents*, Vol. 3657, 1999.
- [6] I.N. Nikolaidis, « Copyright protection of images using robust digital signatures », *Proceedings of ICASSP*, 1996.
- [7] M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini, and A. Piva, « A DCT-domain system for robust image watermarking », *Signal Processing* 66, pp. 357-372, 1998.
- [8] K. Matsui, K. Tanaka and Y. Nakamura, « Digital signature on a facsimile document by recursive MH coding », *Sympos. on cryptography and information security*, 1989.
- [9] K. Tanaka, Y. Nakamura and K. Matsui, « Embedding secret information into a dithered multi-level image », *Proc. IEEE Military Communications Conf.*, pp. 216-220, 1990.
- [10] J. Ruanaidh, F.M. Boland and O. Sinnén, « Watermarking digital images for copyright protection », *Proc Electronic Imaging and the Visual Arts*, 1996.
- [11] A.piva, M. Barni, F. Bartolini and V. Cappellini, « Threshold selection for correlation-based watermark detection », *Proceedings COST 254 Workshop on Intelligent Communications*, pp. 67-72, June 4-6 1998.
- [12] D. Benham, N. Memon and M.B.-L. Yeo, « Fast watermarking of DCT-based compressed images », *Proc. Int. Conf. Image Science, Systems, and Technology*, pp. 243-253, 1997.
- [13] F. Hartung and B. Girod, « Digital watermarking of raw and compressed video », *Proc. SPIE compression technologies and systems for video comm.*, Vol. 2952, pp. 205-213, 1996.
- [14] E. Koch and J. Zhao, « Toward robust and hidden image copyright labeling », *Proc. Workshop nonlinear signal and image processing*, 1995.
- [15] G.C. Langelaar, J.C.A. V. der Lubbe and R.C. Lagendijk, « Robust labeling method for copy protection of images », *Storage and retrieval for Image and Video databases V*, 3022, pp. 298-309, 1997.
- [16] D. Kundur and D. Hatzinakos, « A robust digital image watermarking method using wavelet-based fusion », *Proceedings of the International Conference on Image Processing 1*, pp. 544-547, 1997.
- [17] H.-J. Wang and C.-C. J. Kuo, « An integrated progressive image coding and watermark system », *Proceedings of the ICASSP*, Vol. 5, pp. 3721-3724, 1998.
- [18] P. Bas, J. Chassery and F. Davoine, « Using the fractal code to watermark images », *Proceedings of the International Conference on Image Processing 1*, pp. 470-474, 1998.
- [19] P. Prandoni and M. Vetterli, « Perceptually hidden data transmission over audio signals », *IEEE ICASSP*, Vol. 6, pp. 2665-2668, 1998.
- [20] J. Lacy, S. Quackenbush, A.R. Reibman, D. Shur and J. Suyder, « On combining watermarking with perceptual coding », *Proceedings of ICASSP*, Vol. 6, pp. 3725-3728, 1998.
- [21] J.R. Hernandez, F. Perez-Gonzalez and J.M. Rodriguez, « The impact of channel coding on the performance of spatial watermarking for copyright protection », *Proceedings of ICASSP*, Vol. 5, pp. 2973-2976, 1998.
- [22] J.F. Delaigle, C.D. Vleeschouwer and B. Macq, « Watermarking algorithm based on a human visual model », *Signal Processing*, Vol. 66, pp. 319-335, 1998.
- [23] M. Swanson, B. Zhu, A.H. Tewfik and L. Boney, « Robust audio watermarking using perceptual coding », *Signal Processing (Special issue on watermarking)*, Vol. 66, pp. 337-356, 1998.
- [24] I. Pitas, « A method for signature casting on digital images », *Proceedings of ICIP, IEEE press*, Vol. 3, pp. 215-218, 1996.
- [25] J.L. Mannos and D.J. Sakrison, « The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images », *IEEE transactions on Information Theory*, Vol. IT-20, pp. 525-536, July 1974.
- [26] P. Barten, « Evaluation of subjective image quality with the square-root integral method », *Journal of Optical Society of America* 7, pp. 2024-2031, 1990.
- [27] A. De Rosa, M. Barni, F. Bartolini and A. Piva, « Watermark capacity measure incorporating in a model of the human visual system », *IST/SPIE's 13th International Symposium Electronic Imaging : Multimedia Processing and applications (Security and watermarking of multimedia contents III)*, 2001.
- [28] D.J. Sakrison, « On the role of the observer and a distortion measure in image transmission », *IEEE trans. on Com.*, Vol. 25, No 11, pp. 1251-1267, 1977.
- [29] J.N. Graham, « Detection of grating patterns containing two spatial frequencies ; A comparison of a single channel and multiple channels models », *Vis. Research*, Vol. 11, pp. 251-259, 1971.
- [30] R. Valois and K. Valois, « Spatial vision », *Oxford Univ. Press*, 1988.
- [31] C.D. Burr and S.A. Wijjensundra, « Orientation discrimination depends on spatial frequency », *Vis. Res.*, Vol. 31, No 7/8, pp. 1449-1452, 1991.
- [32] S.J. Anderson, Burr D.C. and M. Morrone, « Two dimensional spatial frequency selectivity of motion sensitive mechanisms in human vision », *J.O.S.A.*, Vol. 8, pp. 1340-1351, 1991.
- [33] G.C. Philips and H. Wilson, « Orientation bandwidths of spatial mechanisms measured by masking », *J.O.S.A.*, Vol. 1, No 2, pp. 226-232, 1984.
- [34] S. Daly, « The visible difference predictor : An algorithm for the assessment of image fidelity », *Proc. of SPIE, Human Vision, Visual Processing and Digital Display*, Vol. III, pp. 2-15, 1992.
- [35] A. Watson, « The cortex transform : Rapid computation of simulated neural images », *Computer Vision and Image Processing*, 39, pp. 311-327, 1987.
- [36] M.A. Georgeson and M. Harris, « Spatial selectivity of contrast adaptation : Models and data », *Vision Research*, Vol. 24, pp. 729-749, 1984.
- [37] J.G. Daugman, « Spatial visual channels in the fourier plane », *Vis. Research*, Vol. 24, No 9, pp. 891-910, 1984.
- [38] A. Saadane, D. Barba and H. Senane, « The estimation of visual bandwidths and their impact in image decomposition and coding », *Proceedings of Visual Communications and Image Processing*, 1993.
- [39] G.E. Legge and J.M. Foley, « Contrast masking in Human Vision », *Journal of the Optical Soc. of America*, 70 (No 12), pp. 1458-1471, 1980.
- [40] J.M. Foley, « Human luminance pattern mechanisms : Masking experiments require a new model », *J.O.S.A.* A 11 (6), pp. 171-1719, 1994.
- [41] D.J. Heeger, « Normalisation of cells responses in cat striate cortex », *Visual Neuroscience*, Vol. 9, pp. 181-198, 1992.
- [42] P.C. Theo and D.J. Heeger, « Perceptual image distortion » *Proc. of SPIE*, Vol. 2179, pp. 127-141, 1994.
- [43] H.R. Wilson and J.R. Bergen, « A four mechanism model for threshold spatial vision », *Vis. Res.*, pp. 19-32, 1979.
- [44] H.R. Wilson D. McFarlane and G.C. Philips, « Spatial frequency tuning of orientation selective inuts estimated by oblique masking », *Vis. Res.*, Vol. 23, pp. 873-882, 1983.
- [45] A. Saadane, N. Bekkat and D. Barba, « On the masking effects in a perceptually based image quality metric », *Advances in the theory of computation and computational mathematics book series*, Vol. Imaging and Vision Systems, 2001.
- [46] CCIR, « Projet de revision de la recommandation 500-4 : méthode d'évaluation subjective de la qualité des images de télévision », *Document commissions d'études du CCIR 11/BL/51-F*, 1992.
- [47] C.I. Poldichuck and W. Zeng, « Image-adaptive watermarking using visual models », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16, pp. 525-539, May 1998.
- [48] G.E. Legge, « Spatial frequency masking in human vision : Binocular interactions », *J. Opt. Soc. Amer.*, A 69 (6), pp. 838-847, 1979.
- [49] A.B. Watson, « DCT quantization matrices visually optimized for individual images », *Human Vision, Visual Processing and Digital Display IV, Proc. SPIE*, Vol. 1913, pp. 202-216, 1993.

Manuscrit reçu le 21 septembre 2001

LES AUTEURS

Florent AUTRUSSEAU



Titulaire d'un DEA d'électronique, systèmes et analyse d'images à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes en 1999. Il prépare actuellement une thèse de doctorat sur le tatouage d'images au sein de l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN). Ses centres d'intérêts sont la modélisation d'images numériques basée sur le système visuel humain et le tatouage.

A. SAADANE



A.Saadane est docteur de l'université de Rennes 1. Il est actuellement maître de conférences à l'école polytechnique de l'université de Nantes. Ses activités de recherches, qu'il mène au sein de l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN), portent sur la caractérisation du système visuel humain et l'exploitation de ses propriétés dans des applications comme le codage, l'évaluation de la qualité et le tatouage d'images.