

**Université du Québec en Outaouais
Département d'Informatique et d'Ingénierie**

**Influence des schémas d'insertion sur la
performance d'un algorithme de marquage basé sur
la contourlette redondante**

Rapport de recherche

Par

Nadia Baaziz et Stéphane McGirr

nadia.baaziz@uqo.ca

Août- 2005

Table des Matières

I-	Introduction	3
II-	La transformée en contourlettes redondantes.....	4
III-	L'algorithme de marquage et approche adaptative	6
IV-	Conditions d'expérimentation et critères d'évaluation.....	9
V-	Exemple de résultat de marquage.....	11
VI-	Comparaison avec un marquage sur ondelettes.....	12
VII-	Analyse de la performance du détecteur.....	15
VIII-	Robustesse face aux manipulations non-malicieuses.....	15
IX-	Influence de l'intensité de marquage.....	17
X-	Les schémas de marquage.....	19
	1- Marquage par niveau de résolution	
	2- Marquage par résolution directionnelle	
	3- Marquage par sous-bandes diagonales	
XI-	Conclusion.....	26
XII-	Références bibliographiques.....	27

Annexe

I. INTRODUCTION

La sécurité des données multimédias constitue de nos jours une problématique importante faisant l'objet de plusieurs recherches aussi bien dans les secteurs académiques que dans les secteurs technologiques et industriels. Ceci est une conséquence directe des avancées connues dans les réseaux de distribution numérique et la prolifération des services multimédias et du commerce électronique, requérant des moyens efficaces de gestion numérique des droits. Dans ce contexte, plusieurs travaux de recherche proposent les techniques de marquage comme des solutions viables à la protection de la propriété intellectuelle, à l'authentification des données et du contenu et à la détection des copies illégales et de l'usage non autorisé d'objets multimédias. Pour un objectif de sécurité visant la protection des droits d'auteur d'une image, le marquage de l'image va consister à insérer une marque identificatrice de l'auteur ou du propriétaire dans l'image de façon à ce que la preuve de propriété puisse être à tout moment démontrée. L'efficacité d'un tel procédé repose essentiellement sur la rencontre de deux propriétés cruciales qui sont: l'invisibilité perceptuelle de la marque dans l'image en préservant ainsi la qualité visuelle perçue de l'image, et la robustesse de la marque se traduisant par la difficulté à effacer la marque de l'image sans distordre de manière significative le contenu de l'image au point de le rendre inutile. Il est important de noter combien il est difficile de satisfaire simultanément les propriétés d'invisibilité et de robustesse puisque l'une a tendance à agir contre l'autre. L'adoption d'une approche adaptative permet d'atteindre un compromis raisonnable. Son principe consiste à exploiter conjointement les propriétés locales des images (régions uniformes ou texturées, brillance, couleurs, contours, ...) avec les caractéristiques fondamentales du système visuel humain telles que la réponse fréquentielle de la vision humaine, la sensibilité à la brillance, aux effets de masquage et à la perception des couleurs [8], [10], [11].

Étant donné que l'insertion de la marque dans l'image peut se faire aussi bien dans le domaine spatial que fréquentiel ou spatio-fréquentiel de l'image, le marquage par approche adaptative a fait l'objet de plusieurs techniques opérant avec succès sur des transformées de l'image présentant des propriétés de localisation spatio-fréquentielles tel que la transformée en ondelettes discrètes.

Ainsi, Bartolini et al. [3] exploitent un modèle dérivant des techniques de compression d'images afin d'adapter le niveau d'intensité du marquage aux caractéristiques du système visuel humain (HVS). La marque est alors ajoutée à chacune des 3 sous-bandes de détails situées au plus haut niveau de résolution. Cette opération d'addition s'accompagne aussi d'une multiplication de chaque point de la marque par un point similaire et provenant d'un masque de pondération. Le masque de pondération fournit une mesure ponctuelle de la sensibilité de l'œil humain aux perturbations locales de l'image. Son calcul implique la prise en compte de caractéristiques de masquage du HVS tel que la sensibilité à l'intensité lumineuse en niveaux de gris, le masquage fréquentiel et l'influence aux effets du bruit près des contours de l'image.

Dans la référence [4], le marquage est effectué sur les coefficients d'une transformée en ondelettes redondantes. L'insertion de la marque est guidée par un masque de corrélation calculé à partir d'une multiplication directe de tous les niveaux de résolution de l'image. Ceci aboutit à l'identification de primitives significatives de l'image;

l'intensité de la marque insérée se trouve ainsi proportionnelle à l'importance des primitives de la région marquée et se traduit par une robustesse de marquage adaptée. A noter que l'aspect redondant de la transformation utilisés a pour conséquence l'augmentation de la simplicité du calcul de corrélation multirésolution puisque tous les niveaux sont maintenant de taille égale. Dans la référence [5], la modélisation d'une fonction de visibilité du bruit (NVF pour Noise Visibility Function) est effectuée en se basant sur un modèle Gaussien stationnaire généralisé. La NVF est alors exploitée pour un masquage perceptuel du marquage dans chacune des sous-bandes ondelettes.

Le travail présenté dans ce document est inspiré des idées avancées dans les approches de marquage adaptatives ainsi que dans les transformées multirésolutions directionnelles d'image. Notre but est d'investiguer le potentiel d'une transformée multirésolution telle que la contourlette et sa propriété d'orientation fréquentielle à apporter une amélioration significative au marquage par approche adaptative. La référence pouvant servir comme base de comparaison serait alors un marquage adaptatif opérant sur des ondelettes tel que développé dans [3]. Ainsi, nous construisons un schéma de marquage opérant sur des coefficients contourlettes. L'approche que nous proposons repose sur l'exploitation des sous-bandes directionnelles contourlettes directionnelles pour générer des masques de pondération directionnels qui capturent les primitives pertinentes de l'image au travers de ses niveaux de résolution et ses orientations (ou direction) fréquentielles. Dans le but d'augmenter la précision de cette approche et de la rendre plus pratique, nous avons introduit une nouvelle variante de la transformée en contourlettes dans laquelle nous diminuons le taux de sous-échantillonnage des niveaux de résolution afin d'assurer à l'ensemble des sous-bandes une même taille. Nous présentons dans la section qui suit, une description brève de la transformée en contourlettes suivie par quelques détails sur la construction de la nouvelle variante que nous appelons par contourlettes redondantes. La section IV expose l'algorithme de marquage par contourlettes et les formulations du calcul des masques de pondération directionnels. La section V étale les résultats de comparaison de notre technique avec une méthode adaptative basé sur les ondelettes et en évalue les performances en termes d'invisibilité et de robustesse. Les schémas de marquage sont exposés dans la section VI, et ont pour objectifs de trouver une ou plusieurs bonnes façons de répartir le marquage au travers des résolution et des directions. L'approche est à priori expérimentale mais les résultats rencontrent des justifications réalistes et logiques.

II. La transformée en contourlettes redondantes

Minh Do et Martin Vetterli [6], [7] ont introduit la transformée en contourlettes discrètes. Cette transformée obéit à un nouveau schéma de décomposition multirésolution qui permet de représenter l'image comme un ensemble compact de niveaux de résolutions spatiales et directionnelles (orientées). Sa construction se fait en deux étapes de décomposition successives : une décomposition en un nombre de niveaux de résolutions spatiales suivie d'une décomposition en un autre nombre de résolutions directionnelles. La première étape obéit à l'algorithme de construction de la pyramide Laplacienne et transforme l'image à l'entrée en une image d'approximation basses

fréquences et LP images de détails (sous-bandes). Il est connu que ce schéma de décomposition est légèrement redondant ou sur-échantillonné, ce qui mène à un nombre de coefficients équivalent au 4/3 du nombre de pixels de l'image. La deuxième étape utilise un banc de filtres en diamond et en damier suivi d'un échantillonnage critique, pour décomposer chaque niveau Laplacien en plusieurs sous-bandes directionnelles (en forme d'hélices) qui capturent les fréquences directionnelles. L'ensemble des sous-bandes ainsi obtenu constitue une représentation complète et fidèle de l'image. Ainsi, l'algorithme de reconstruction par contourlettes garantit une reconstruction parfaite de l'image. peut être appliquée Lorsqu'on la compare à la transformée en ondelettes discrètes, la transformée en contourlettes avec sa caractéristique de directionalité présente déjà de nouveaux potentiels attrayant pour le traitement des images en général.

Dans le cadre de notre travail sur le marquage des images, nous avons choisi d'introduire une nouvelle variante de la transformée en contourlettes discrète. La modification majeure consiste à maintenir une redondance élevée dans les sous-bandes contourlettes. Le but de cette modification est d'assurer un schéma de représentation de l'image où toutes les sous-bandes directionnelles sont de tailles égales (ayant un même nombre de coefficients contourlettes), ce qui facilite et augmente la précision de tout traitement faisant appel à la coopération ou à la fusion de plusieurs sous-bandes. Une façon d'atteindre ce but est de supprimer toutes les opérations de sous-échantillonnage dans le schéma de la pyramide Laplacienne donnant lieu à une transformation Laplacienne redondante et de là à une contourlette redondante [1], [2]. Ainsi, La transformée en Laplacienne redondante à L niveaux d'une image résulte en $L+1$ sous-bandes toutes de même taille que l'image originale (une image d'approximation basses fréquences et L sous-bandes de détails) . À la deuxième étape de décomposition, seuls les sous-bandes de détails sont soumises aux bancs de filtres à D bandes pour produire les sous-bandes directionnelles (voir la Figure 1 ci-dessous.), la cadence d'échantillonnage de ce banc de filtres est de D . Ainsi, étant donné une image originale de taille DMN , notre représentation de cette image en contourlettes redondantes sera constituée de LD sous-bandes directionnelles de taille MN , en plus de l'image d'approximation de taille DMN . Chaque sous-bande sera représentée par une sous-image $\{C_{ld}(i, j), i=1..M, j=1..N\}$ où l est son niveau de résolution et d sa direction fréquentielle. L'image d'approximation sera indiquée par la sous-image $\{C_{L+1}(i, j), i=1..MD/2, j=1..ND/2\}$ Il est à noter que l'image d'approximation est sur-échantillonnée et peut être aisément et correctement sous-échantillonnée à une cadence D pour exhiber le même nombre de coefficients que les sous-bandes directionnelles, à savoir MN . Un algorithme de reconstruction par contourlettes redondantes est aussi construit [2]. Il garantit une reconstruction parfaite de l'image à partir de toutes ses sous-bandes.

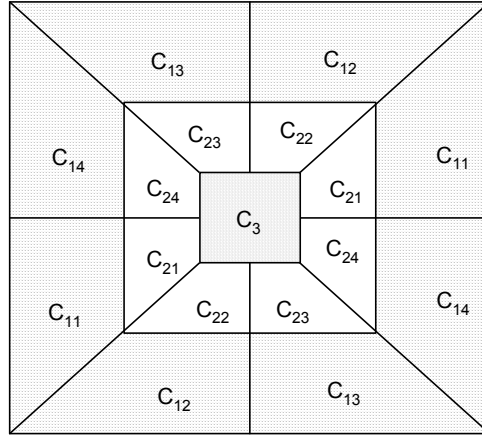


Figure 1. Représentation fréquentielle de la décomposition en contourlettes redondantes ayant 3 niveaux de résolution ($L=2$) et 4 directions fréquentielles ($D=4$). L'image d'approximation (basses-fréquences C_3) ne subit pas de décomposition directionnelle.

III. L'algorithme de marquage

L'algorithme de marquage des sous-bandes contourlettes est décrit dans [1], cependant, nous nous étendons ici sur étapes de marquage et l'explication des équations essentielles nous permettant ainsi de mieux comprendre la série d'expérimentations effectuées et les résultats associés. La marque W à insérer est structurée sous forme de plusieurs matrices $W_{l,d}(i,j)$, ayant chacune une taille de MN éléments à valeurs binaires $\{-1,1\}$ aléatoirement distribuées. La taille MN correspond à la taille d'une bande contourlet alors que les indices l, d indiquent à quelle bande contourlet $C_{l,d}$ est destinée la marque $W_{l,d}$. En général, il appartient à l'utilisateur de déterminer le nombre de marques à utiliser, et par conséquent, le nombre de bandes contourlet à marquer. Ce nombre est notamment influencé par la capacité du message informatif à insérer.

L'insertion d'une marque dans une bande contourlet se fait selon une méthode additive et pondérée tel qu'explicité dans l'équation suivante :

$$C'_{l,d}(i, j) = C_{l,d}(i, j) + \alpha M_d(i, j) W_{l,d}(i, j) \quad (1)$$

où $C'_{l,d}$ est une bande contourlet marquée à la résolution l et la direction fréquentielle d , α est un paramètre de contrôle de l'énergie de la marque insérée et M_d est un masque de pondération directionnelle qui adapte le niveau de robustesse et d'invisibilité aux caractéristiques locales de l'image dans une direction fréquentielle donnée. Ce masque est calculé en introduisant des modifications à l'approche proposée dans [3]. Ces modifications concernent notamment la prise en compte par le masque de l'orientation fréquentielle des données à marquer puisque ceci constitue la caractéristique intéressante de la transformée en contourlet. Ainsi, la sensibilité de l'œil au bruit, aux variations de la brillance, et la présence de primitives significatives de l'image (textures, contours) sont pris en considération. Pour une direction fréquentielle donnée d de la décomposition en contourlet, M_d est généré comme suit:

$$M_d(i, j) = \frac{1}{2} B(i, j) T(i, j)^{0.2} E(d, i, j)^{0.2} \quad (2)$$

où

$$B(i, j) = 1 + \frac{1}{256} C_{L+1}(2i-1, 2j-1) \quad (3)$$

$$T(i, j) = Var \{ C_{L+1}(2i-1+y, 2j-1+x) \}_{x=0,2; y=0,2} \quad (4)$$

$$E(d, i, j) = \frac{1}{4} \sum_{l=1}^L \sum_{x=0,1} \sum_{y=0,1} [C_{l,d}(i+y, j+x)]^2 \quad (5)$$

Le facteur B est proportionnel aux valeurs de luminance de l'image d'approximation (bande de basses fréquences). Le facteur T capture l'activité de la texture au sein d'un voisinage dans la bande des basses fréquences alors que le facteur E mesure la présence de contours orientés dans les images sous-bandes directionnelles. Étant donné que notre décomposition (telle que décrite dans la section x) comporte exactement 4 directions, le nombre de masques de pondération ainsi calculé est exactement de 4. Cependant, l'utilisation ou non de chacun des masques dépend du schéma de marquage adopté, c.à.d. quelles directions et quelles résolutions sont marquées. Les possibilités et performances des schémas de marquage seront abordées plus loin dans ce document.

Une fois l'insertion des marques est effectuée, l'image marquée est alors obtenue à partir des toutes ses sous-bandes en utilisant l'algorithme de reconstruction par contourlettes redondantes.

L'algorithme de détection de la marque est basé sur le calcul d'une valeur de corrélation R' suivi d'une comparaison de la valeur obtenue par rapport à un seuil pré-calculé T . la valeur R' est une mesure moyenne de la corrélation entre les données de la marque et les données des images sous-bandes appropriées, c.à.d., potentiellement concernées par le marquage. Étant donné une marque W , une image pour laquelle on veut prouver la présence ou non de cette marque, un schéma de marquage opérant sur K sous-bandes, le processus de détection commence par décomposer l'image en sous-bandes contourlets, puis calcule la valeur de corrélation R' selon la formule suivante:

$$R' = \frac{1}{K} \sum_l \sum_d R(l, d) \quad (6)$$

où

$$R(l, d) = \begin{cases} \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N C'_{l,d}(i, j) W_{l,d}(i, j) & \text{if } C_{l,d} \text{ is marked} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

Si $R' > T$ alors la marque W est présente dans l'image testée. Cette méthode de marquage est dite aveugle puisque le processus de détection ne requiert aucunement l'utilisation de l'image originale (non-marquée.) La valeur du seuil de décision T est déterminée par un calcul *à posteriori* issu du critère de Neyman-Pearson [3] et adapté aux sous-bandes contourlettes marquées. Cette adaptation suppose une probabilité d'erreur de détection de 10^{-8} et se formule essentiellement comme suit :

$$T = 3.97 \sqrt{2\sigma^2} \quad (8)$$

où

$$\sigma^2 = \frac{1}{(KMN)^2} \sum_l \sum_d \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N C'_{l,d}(i,j)^2 \quad (9)$$

Il est à noter que seules les sous-bandes concernées par le schéma de marquage sont impliquées dans le calcul de corrélation et dans le calcul du seuil de décision.

IV. Conditions d'expérimentation et critères d'évaluation

Afin de valider cette technique de marquage et en évaluer les performances, une séquence de tests étendue et intensive a été appliquée à différentes images. Les tests concernent d'une part la variation et l'ajustement du paramètre d'intensité du marquage α afin d'atteindre le meilleur compromis entre les performances en invisibilité et en robustesse, et d'autre part, l'application de traitements d'attaques afin de montrer la robustesse du marquage aux manipulations intentionnelles ou non-malicieuses. Les manipulations d'attaques proviennent du benchmark Stirmark [9]. Les images originales utilisées sont Lena, Peppers, Baboon, Fishing_boat et Airplane_f16. Leur tailles sont toutes égales à 512x512 pixels et seule l'intensité en 256 niveaux de gris est considérée dans le processus de marquage.

Chaque opération de marquage requiert que l'image à marquer soit décomposée en contourlettes redondantes avec $L=3$ et $D=4$. Ce qui transforme l'image à marquer en 12 sous-bandes contourlettes directionnelles $C_{ld}(i,j)$ toutes de même taille égale à 256x256 coefficients en plus de la sous-image d'approximation (basses fréquences) de taille égale à 512x512. La représentation spatiale de l'ensemble des sous-bandes issues de la décomposition est schématisée dans la figure x ci dessous.

Pour une image originale donnée, toute opération de marquage peut différer d'une autre selon le choix de la valeur de l'intensité du marquage α et du schéma de marquage utilisé, c.à.d. le choix des sous-bandes à marquer. Cette différence va directement influencer sur l'invisibilité de la marque dans l'image marquée, autrement dit, sur l'ampleur de la distorsion introduite dans l'image par l'effet du marquage. Le degré d'invisibilité est évalué de 2 façons, soit qualitativement ou quantitativement.

- a) qualitativement : par observation de la qualité visuelle des images marquées obtenues et de la présence ou absence d'information dans l'image de différence pixel à pixel entre l'image originale et l'image marquée.
- b) quantitativement par un calcul des valeurs minimales et maximales (Min et Max) de l'image de différence ou encore mieux par un calcul du rapport signal à bruit (PSNR) tel que donné dans l'équation qui suit :

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} [255^2 / \sum_i \sum_j \text{diff}(i,j)^2]$$

avec

$$\text{diff}(i,j) = \text{image_originale}(i,j) - \text{image_marquée}(i,j), i=1..512, j=1..512$$

En général, un PSNR supérieur à 34dB témoigne d'une très bonne qualité visuelle de l'image marquée. Une autre mesure peut être utilisée pour quantifier la robustesse du marquage face aux manipulations. Il s'agit de la distance entre la réponse du détecteur de la marque (valeur de corrélation) et le seuil de décision T . Il est clair que plus cette distance ($R-T$) est grande, meilleure est la robustesse du marquage aux tentatives d'effacement ou de destruction. Notons que dans les courbes des figures montrées, les noms de variables R_o et α et T renvoient respectivement aux valeurs \hat{R} , α et T .

C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}
C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}
C_4			

Figure 2. Représentation spatiale des sous-bandes issues d'une transformation en contourlettes redondantes avec $L=3$ et $D=4$. Le nombre total de sous-bandes est 13. Une image d'approximation basses fréquences (C_4) de l'image originale à la résolution $l=4$ et 3 sous-bandes pour chacune des 4 directions fréquentielles $\{d=1,2,3 \text{ et } 4\}$, ou bien 4 sous-bandes pour chaque niveau de résolution $l \{l=1,2 \text{ et } 3\}$.

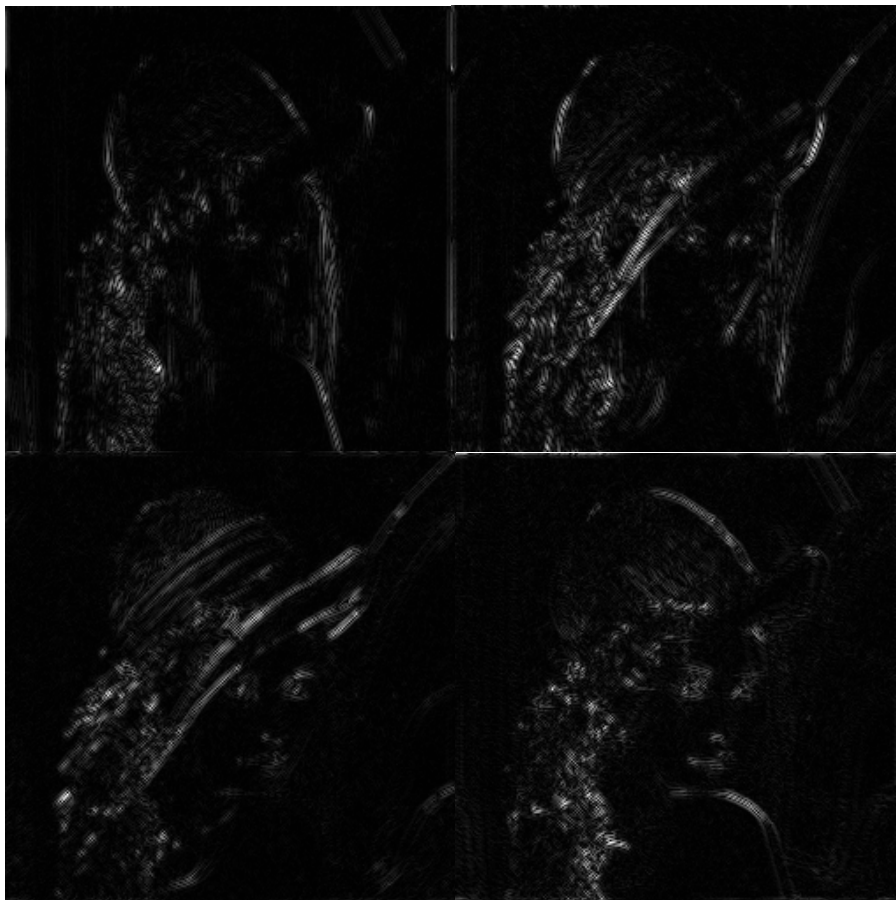


Figure 3 : Sous-bandes contourlettes C_{21} , C_{22} , C_{23} et C_{24} de l'image Lena (de haut en bas et de gauche vers la droite respectivement). L'orientation des contours selon les résolutions directionnelles est apparente dans les différentes sous-bandes.

V- Exemple de résultats de marquage

La table I ci-dessous montre les résultats d'un marquage pour chacune des 5 images de test. Dans ce cas, le marquage s'est fait sur les 4 sous-bandes du niveau de résolution 2. Toutes les marques ont été détectées avec succès et l'invisibilité de la marque est assurée pour chacun des cas, tel que les valeurs de PSNR le montrent.

Dans la figure 4, on peut constater la qualité de l'image marquée ainsi que la quantité et la localisation de la distorsion introduite lors du marquage tel que c'est montré dans l'image de différence. Le masquage de la distorsion est en effet appréciable, et ce grâce à la performance des masques de pondération directionnelle à localiser les régions adéquates et significative pour le marquage. Les masques de pondération obtenus pour l'image Lena sont montrés dans la figure 5.

TABLE I. INSERTION ET DÉTECTION DE MARQUE DANS LES 5 IMAGES DE TESTS. 4 MARQUES SONT INSÉRÉES DANS 4 SOUS-BANDES CONTOURLETTES DU NIVEAU DE RÉOLUTION 2.

Image	α	PSNR	Max	Min	Détection	T	Ř
Lena	1.15	35.75	34.1	-33.7	1	0.0680	0.6198
Peppers	1.15	34.39	32.7	-34.5	1	0.0650	0.6858
Baboon	1.15	33.99	32.0	-31.0	1	0.1367	0.8520
Fishing Boat	1.15	35.40	34.49	-32.35	1	0.0918	0.7156
Airplane_f16	1.15	34.26	35.4	-38.2	1	0.0858	0.6480



Figure 4. L'image Lena marquée (à gauche) et la différence absolue (à droite) entre l'image originale et l'image marquée. L'image de différence est amplifiée par un facteur de 8 pour améliorer la visibilité des points de distorsion.

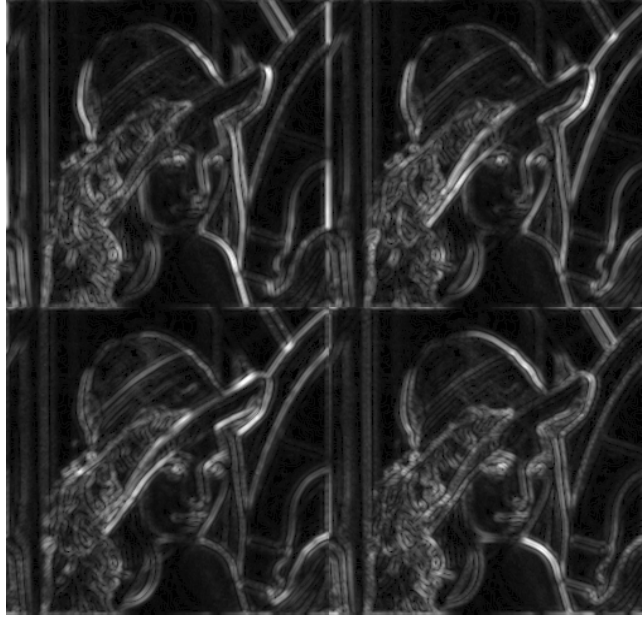


Figure 5. Exemple de 4 masques de pondération directionnelle, respectivement, M_1 , M_2 , M_3 , et M_4 (de haut à gauche vers bas à droite) calculés à partir de la décomposition en contourlettes redondantes de l'image Lena avec $L=3$ et $D=4$. Les régions significatives et adéquates au marquage ont de grandes amplitudes (montrées en blanc) et sont situées essentiellement près des contours et dans les régions texturées de l'image.

VI- Comparaison avec un marquage sur ondelettes

Afin de valider notre méthode de marquage ainsi construite, il était utile de la comparer à une méthode similaire développée sur les ondelettes telle que décrite dans [3]. La transformée en ondelettes utilise les filtres de Daubechies-6 et le marquage est appliqué sur les 3 sous-bandes de niveau de résolution 1 (le plus haut niveau de résolution). Ce choix est justifié par le fait que ces trois sous-bandes ont exactement la même taille que les sous-bandes contourlettes et vont donc pouvoir recevoir les mêmes marques (avec la même capacité). Les différences majeures entre les 2 méthodes concernent le type de transformée, l'absence de redondance dans les sous-bandes ondelettes et l'absence de directionalité dans les masques de pondération calculés sur les sous-bandes ondelettes. Les résultats apparaissant dans la table I montrent des valeurs du PSNR et de la réponse du détecteur dans le cas du marquage par ondelettes avec un facteur $\alpha = 0.75$. Des résultats similaires en performance d'invisibilité (PSNR) sont obtenus par un marquage sur contourlettes opérant sur les 4 sous-bandes directionnelles du niveau de résolution 2 et utilisant un facteur d'intensité $\alpha = 1.15$. Donc, le marquage par contourlettes atteint les mêmes performances que le marquage par ondelettes avec une plus grande intensité de marquage et une plus grande capacité de la marque (4 marques au lieu de 3). Si on diminue la capacité de marquage à 3 marques, les performances en invisibilité du marquage par contourlettes sont alors supérieures. Les performances sont de loin supérieures aussi bien en terme de PSNR que de distance si on applique les mêmes paramètres de marquage que pour le cas ondelettes, à savoir, marquage de 3 sous-bandes

contourlettes du niveau de résolution 1, avec $\alpha = 0.75$. la table II montre aussi les résultats pour ce cas.

TABLE II. RÉSULTATS DE MARQUAGE PAR ONDELETTESS SUR LE NIVEAU 1 ET PAR CONTOURLETTES SUR LE NIVEAU DE RÉOLUTION 2. 3 OU 4 SOUS-BANDES SONT UTILISÉES.

Technique de marquage	Contourlette (3 sous-bandes)	Ondelette (3 sous-bandes)	Contourlette (4 sous-bandes)
Facteur d'intensité α	1.15	0.75	1.15
PSNR	37.33	36.58	36.51
Seuil de décision T	0.0761	0.0252	0.0621
Réponse de détection \hat{R}	0.6183	0.8866	0.5800
Technique de marquage	Contourlette (3 sous-bandes)	Ondelette (3 sous-bandes)	
Facteur d'intensité α	0.75	0.75	
PSNR	41.32	36.58	
Seuil de décision T	0.0434	0.0252	
Réponse de détection \hat{R}	0.9335	0.8866	

Si les performances des deux méthodes sont différentes, ceci est en grande partie dû au calcul des masques de pondération et à leur potentiel à identifier et localiser les primitives adéquates au marquage avec masquage visuel. En effet, si on regarde les masques de pondération obtenus pour l'image Lena (voir Figure 6), nous constatons dans le cas des contourlettes, une meilleure précision de la localisation des primitives capturées ainsi qu'une différence d'orientation nette d'un masque à un autre des primitives localisées. Ceci étant les conséquences de la propriété d'orientation fréquentielle de la transformée en contourlettes ainsi que la redondance qui augmente la précision des calculs. Dans le cas des ondelettes, les masques calculés sont presque similaires d'une sous-bande à une autre et souffrent d'un étalement des primitives localisées et d'un effet de bloc causé par les interpolations requises pour faire coopérer les niveaux de résolution dans le calcul des masques.

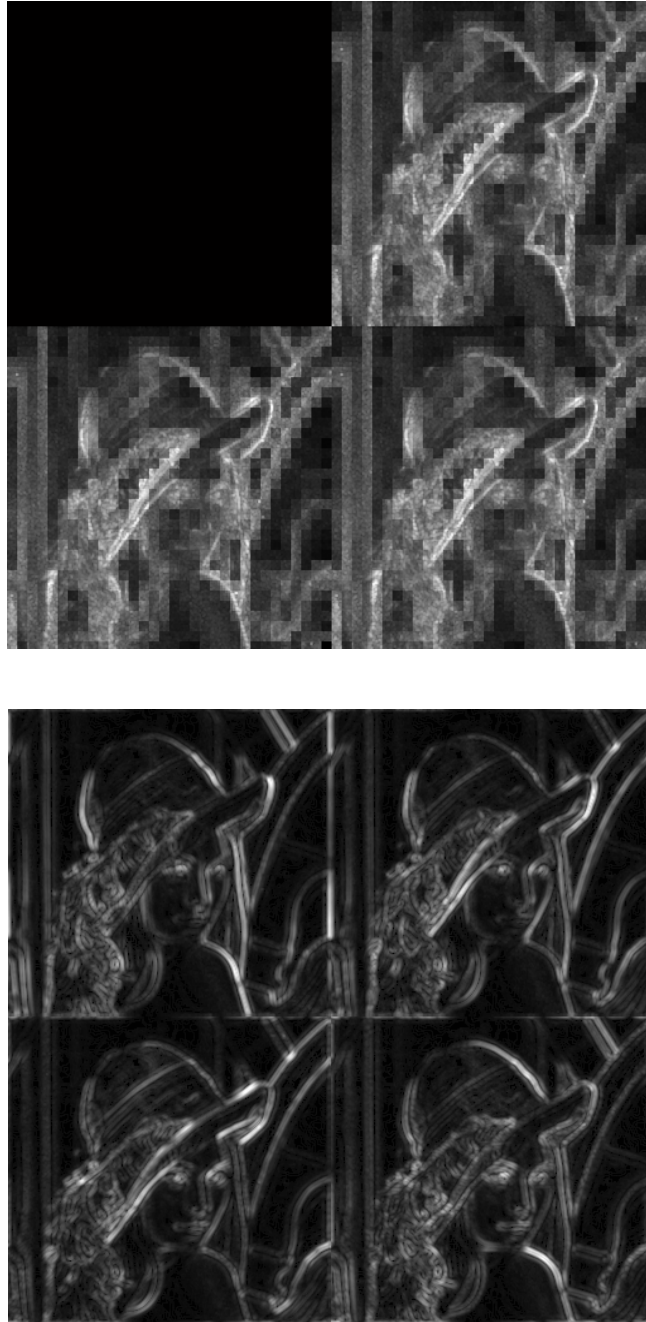


Figure 6. Exemple de masques de pondération calculés pour l'image Lena décomposée en ondelettes (en haut), et décomposée en contourlettes redondantes. Seuls 3 masques sont calculés dans le cas des ondelettes. La précision de la localisation des régions significatives ainsi que l'orientation des primitives identifiées est très nette dans le cas des contourlettes redondantes.

VII- Analyse de la performance du détecteur

Afin d'évaluer la performance du détecteur par corrélation à détecter la présence d'une marque donnée, nous avons obtenu sa réponse (à plusieurs reprises) pour une image marquée en lui soumettant 1000 marques différentes parmi lesquelles figure la marque véritablement insérée dans l'image. Pour toutes les tentatives, nous avons obtenu le même résultat, à savoir, une détection correcte (1) correspondant à la marque véritablement insérée, et 999 détections fausses (0) correspondant aux 999 marques restantes (non présentes dans l'image considérée). De plus, ces tests ont permis de valider le calcul *à posteriori* du seuil de décision T (voir les équations 8 et 9). Il est à noter que ce calcul offre un avantage considérable par le fait que la connaissance de l'image originale ne soit pas requise.

VIII- Robustesse face aux manipulations non-malicieuses

Pour évaluer la robustesse de la méthode de marquage par contourlettes, des compressions JPEG avec plusieurs facteurs de qualités (allant de 1 à 100) ont été appliquées sur des images marquées. Ces images marquées et compressées ont été soumises au détecteur pour vérifier la présence de la marque. Plus exactement, pour chaque cas de compression JPEG, 1000 marques sont soumises à détection, et parmi celles-ci figure la marque véritablement insérée dans l'image. Les résultats obtenus ont montré que d'une manière générale, tant que le facteur de qualité de la compression est supérieur à la valeur 5, la vraie marque est détectée présente alors que les 999 marques restantes sont toujours déclarées absentes (détection 0). Le résultat d'un exemple de simulation est montré à la figure 7. Nous pouvons y voir les seuils de décision T calculés pour chaque cas de compression JPEG de l'image Lena. Nous pouvons aussi constater que, tant que le facteur de compression est plus grand que 5, la réponse du détecteur en terme de valeur de corrélation \hat{R} correspondante à la vraie marque est toujours supérieure au seuil. Par contre, la plus grande valeur de corrélation \hat{R} obtenue pour les 999 marques restantes est toujours inférieure au seuil de décision T . De plus, d'autres manipulations ou traitements (filtrage, quantification, ...) ont été appliquées à l'image marquée dans le même soucis de mettre à épreuve la qualité de robustesse de la méthode, et l'analyse des résultats obtenus permet de tirer des conclusions allant dans le même sens que précédemment (voir une ébauche de résultats dans la table III). Ainsi, la méthode de marquage par contourlettes jouit d'une robustesse élevée vis-à-vis de manipulations usuelles et non-malicieuses telles que la compression JPEG. Même si ces manipulations engendrent de fortes distorsions de l'image, la marque insérée reste malgré tout détectable.

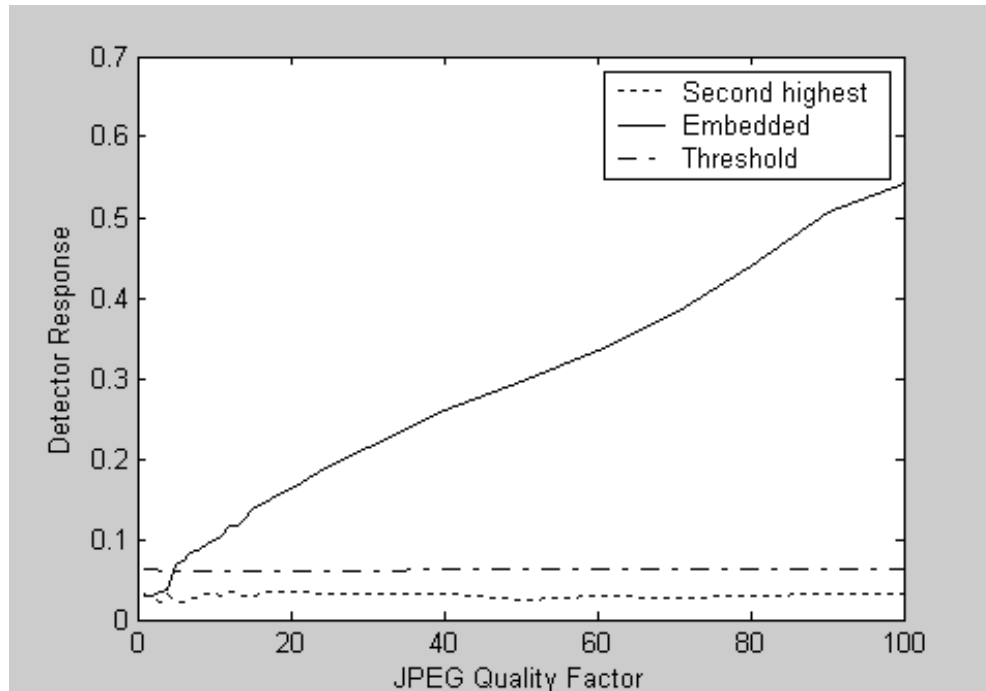


Figure 7 : Réponse du détecteur par corrélation (\hat{R}) en fonction du facteur de qualité de la compression appliquée à l'image marquée (1..100). Pour chaque compression, 1000 marques ont été testées pour présence, parmi celles-ci figure la vraie marque. La plus grande valeur de \hat{R} correspondant à une fausse marque est toujours inférieure au seuil de détection T .

TABLE III. RÉPONSE DU DÉTECTEUR R' LORSQUE DES MÉTHODES DE TRAITEMENT VARIÉES SONT APPLIQUÉES À L'IMAGE MARQUÉE LENA. 1000 MARQUES ONT ÉTÉ TESTÉES POUR PRÉSENCE, PARMY CELLES-CI FIGURE LA VRAIE MARQUE. 'Second highest' EST LA PLUS GRANDE VALEUR \hat{R} OBTENUE POUR LES 999 FAUSSES MARQUES.

Méthode de traitement	T :Seuil de décision	\hat{R} :plus grande valeur pour les fausses marques	\hat{R} :pour la vraie marque
Filtrage médian 5x5	0.0369	0.0124	0.0539
Quantification (8 niveaux)	0.0696	0.0356	0.5665
Quantification (16 niveaux)	0.0645	0.0324	0.5351
JPEG (5)	0.0595	0.0214	0.0670
JPEG (15)	0.0609	0.0284	0.1363
Distortion locale	0.0621	0.0335	0.5331

IX- Influence de l'intensité de marquage

La performance du marquage en termes d'invisibilité (PSNR) et de robustesse (distance $\hat{R} - T$) dépend énormément de la valeur du facteur d'intensité de marquage alpha (ou α). En effet, si la valeur de ce facteur est élevée, l'énergie de la marque insérée (après pondération) est plus grande. On s'attend alors à ce que le PSNR diminue car la distorsion introduite par le marquage est plus grande. Cette augmentation de la valeur de α implique aussi une plus grande robustesse de la marque insérée, et se traduit donc par une augmentation de la valeur de corrélation \hat{R} lors de la détection de la vraie marque. Ainsi, une plus grande distance entre \hat{R} et le seuil de décision T est observée.

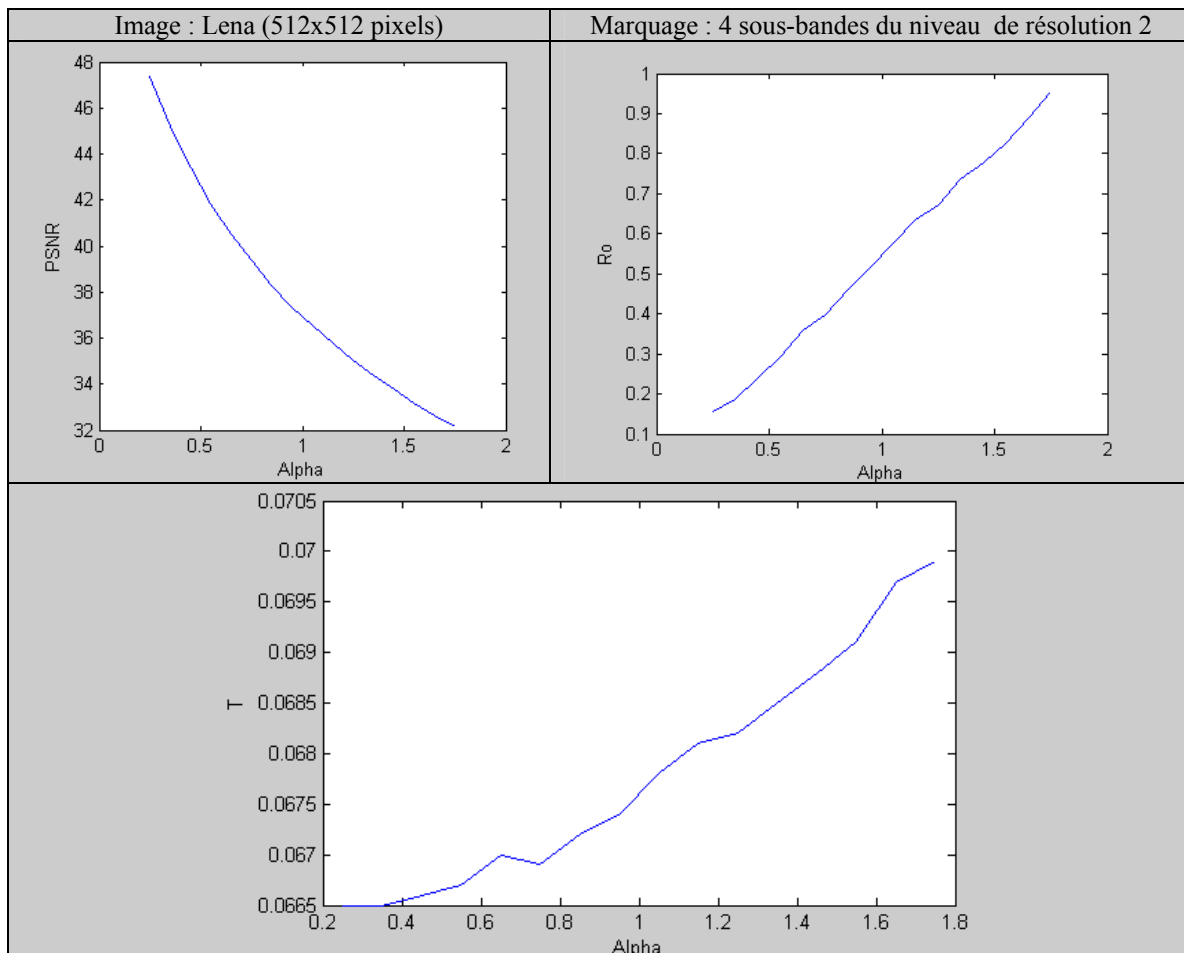


Figure 8. Résultats de marquage ($PSNR$, \hat{R} et T) de l'image Lena en fonction de la valeur du facteur d'intensité de marquage α (ou alpha). La valeur R_o indique \hat{R} .

La figure 8 illustre parfaitement cette analyse au travers des résultats ($PSNR$, \hat{R}) du marquage de l'image Lena lorsque la valeur du facteur d'intensité α varie entre 0.25 et 1.75. À noter que le marquage s'est fait sur les 4 sous-bandes contourlettes du niveau de résolution 2. Des résultats similaires obtenus pour d'autres images peuvent être trouvés dans l'annexe de ce document (figures A.1 et A.2). La figure 9 montre l'évolution de la

valeur du seuil de décision T lorsque α varie entre 0.25 et 1.75. Même si T augmente, le taux d'augmentation reste très faible devant celui de la valeur de corrélation \hat{R} (voir l'échelle des valeurs de T .)

À l'issue de toutes les simulations effectuées (voir la figure 9), nous pouvons constater qu'un bon compromis entre la robustesse et l'invisibilité est possible pour des valeurs de α autour de 0.75.

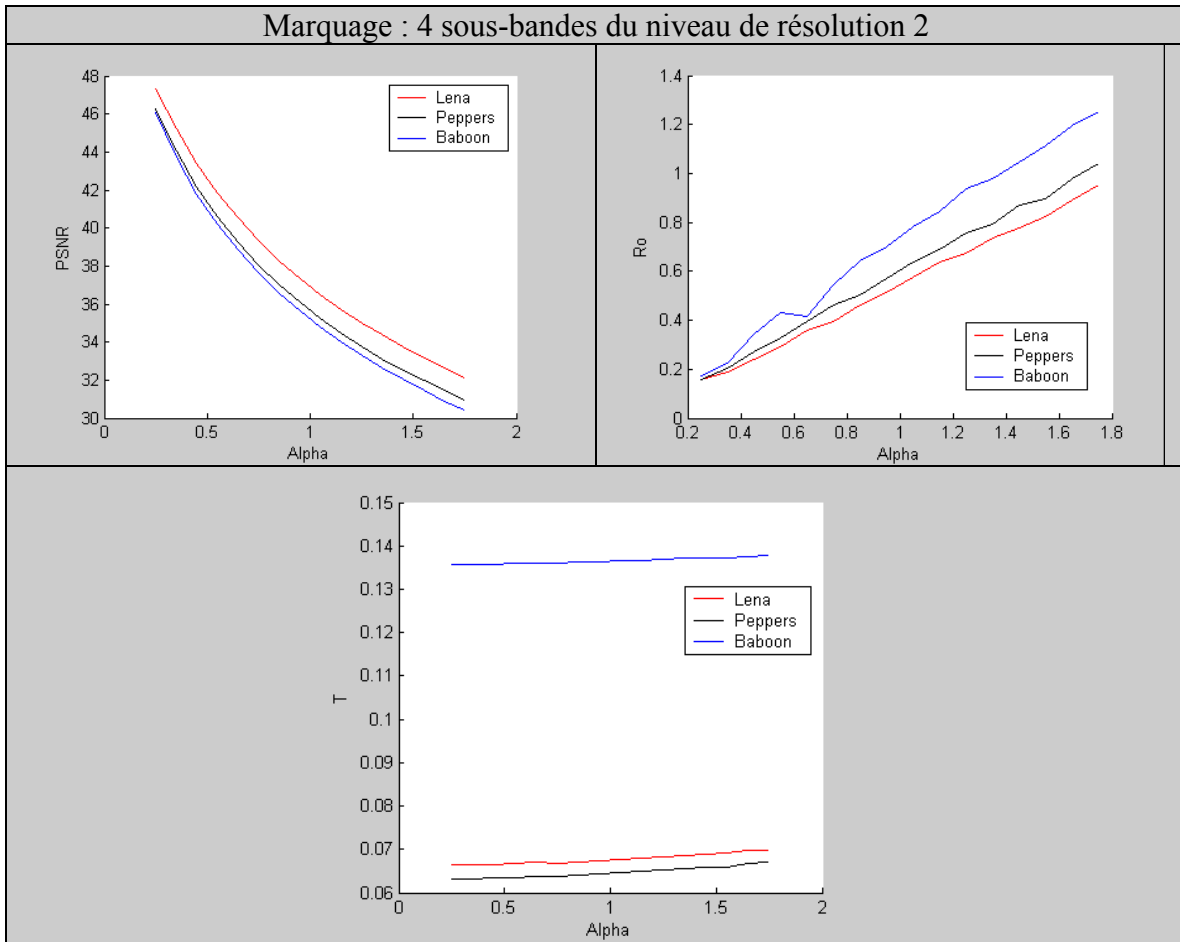


Figure 9 : Comparaison des résultats de marquage ($PSNR$, \hat{R} et T) de plusieurs images en fonction de la valeur du facteur d'intensité de marquage α (ou alpha). La valeur R_0 indique \hat{R} . Contrairement au $PSNR$ et à \hat{R} , le seuil de décision T est presque constant lorsque alpha varie.

X- Les schémas de marquage

Un schéma de marquage a pour objectif de déterminer sur quelles sous-bandes de la transformée en contourlettes seront insérées les marques. Plusieurs schémas de marquage sont possibles, mais seulement quelques uns parmi eux ont été élaborés et testés. Le but étant de tenter de déterminer un ou plusieurs schémas réalisant un bon compromis entre la robustesse du marquage et son invisibilité. Chaque schéma de marquage est identifié par un numéro unique qui renvoie aux sous-bandes impliquées dans le processus de marquage. Chaque sous-bande est indiquée à son tour par le couple (l,d) , l pour le niveau de résolution et d pour la direction. La table IV ci-dessous décrit les schémas de marquage sélectionnés.

TABLE IV. DESCRIPTION DES SCHÉMAS DE MARQUAGE RETENUS POUR LES TESTS.

Numéro du schéma de marquage	Sous-bandes Marquées
	Marquage par niveau de résolution : 4 sous-bandes marquées
1	(1,1), (1,2), (1,3), (1,4)
2	(2,1), (2,2), (2,3), (2,4)
3	(3,1), (3,2), (3,3), (3,4)
	Marquage par niveau de résolution, 3 sous-bandes marquées
4	(1,1), (1,2), (1,3)
5	(1,2), (1,3), (1,4)
	Marquage par direction, 3 sous-bandes marquées
6	(1,1), (2,1), (3,1)
7	(1,2), (2,2), (3,2)
8	(1,3), (2,3), (3,3)
9	(1,4), (2,4), (3,4)
	Marquage par diagonale, 3 sous-bandes marquées
10	(1,1), (2,2), (3,3)
11	(1,2), (2,3), (3,4)
12	(1,3), (2,2), (3,1)
13	(1,4), (2,3), (3,2)

1-Marquage par niveau de résolution

Ce type de marquage implique les schémas 1, 2,3, 4, et 5. Les schémas 1, 2 et 3 opèrent sur les niveaux de résolution 1,2 et 3 respectivement. Chacun de ces schémas marque les 4 sous-bandes directionnelles du niveau concerné. Les résultats prélevés lors des simulations de marquage sur les images de tests portent sur le seuil de décision du détecteur, sa réponse en valeur de corrélation \hat{R} et le PSNR de l'image marquée. La figure 10 rapporte un exemple de résultats de simulation des schémas de marquage 1,2 et 3 obtenus pour l'image Lena. D'autres résultats (pour les autres images de test) figurent dans l'annexe de ce document (figures A.3, A.4 et A.5).

À l'issue de toutes ces simulations, les conclusions préliminaires peuvent être résumées comme suit :

- Les seuils de décision sont différents d'un niveau de résolution à un autre.
- Lorsque le facteur d'intensité α varie et croît, les seuils de décision sont quasi constants pour les niveaux de résolution 2 et 3, mais sont croissants pour le niveau 1.
- Pour les niveaux de résolution 1 et 2, la croissance des valeurs de corrélation en fonction de α est plus rapide que celle des seuils de décision. Ainsi la distance ($\hat{R} - T$) en fonction de α est croissante pour ces niveaux.
- Pour le niveau de résolution 3 (schéma 3), il apparaît un sérieux problème quant à la détection de la marque. La distance ($\hat{R} - T$) est minimale et parfois même quasi nulle. D'autres tests s'avèrent nécessaires pour bien comprendre ce problème et le résoudre.
- Pour une valeur de α donnée, la valeur de PSNR obtenue pour chacun des schémas est constante, si bien que les courbes de PSNR(α) pour les 3 niveaux sont confondues. L'explication de ce phénomène n'est pas encore trouvée.

Finalement, vu que le choix du niveau de résolution n'influe pas sur l'invisibilité de la marque, le critère de distance maximale ($\hat{R} - T$) mettrait en faveur le marquage sur le niveau 1. C'est ainsi que nous avons introduit les schémas de marquage 4 et 5. Leur particularité est de se limiter au marquage de 3 bandes au lieu de 4, pour pouvoir assurer une meilleure comparaison avec le restant des schémas. En effet, pour le restant des schémas proposés (6...13), seules 3 bandes sont marquées. À partir des résultats de marquage par schéma 4 ou 5, et figurant dans la table V, nous pouvons conclure que des valeurs de PSNR très élevées (autour de 40 dB) sont obtenues pour une valeur de $\alpha=0.75$, la distance ($\hat{R} - T$) est suffisamment grande mais cela n'est pas suffisant pour assurer toute la robustesse dont nous avons besoin. En effet, compte tenu de manipulations intentionnelles ou malicieuses, un simple filtrage pourrait affecter sérieusement le contenu du niveau de résolution 1. Dans ce cas, la présence de marque dans les niveaux 2 et 3 ne peut être qu'utile pour la robustesse du système.

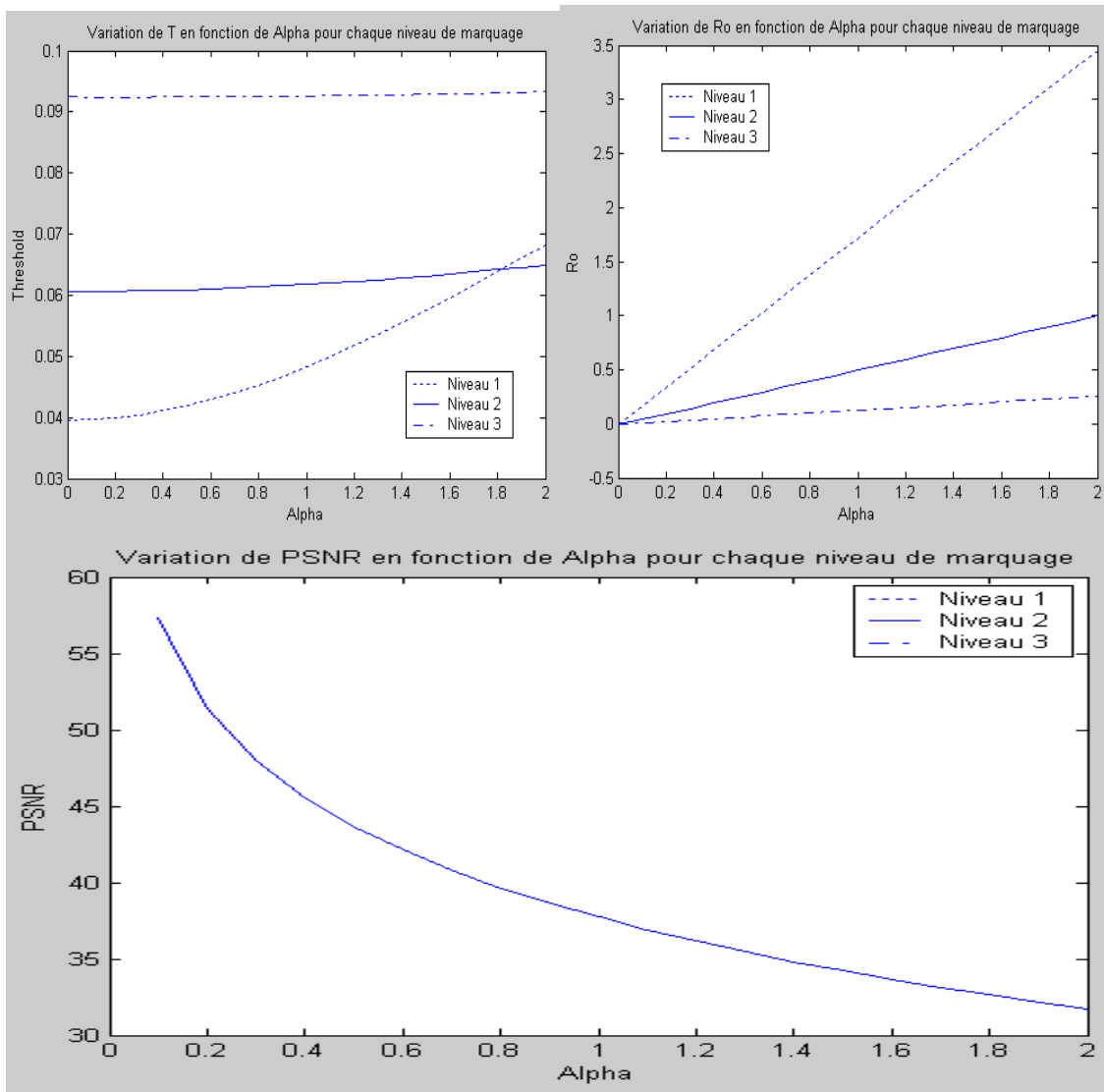


Figure 10 : Résultats $T(\alpha)$, $\hat{R}(\alpha)$, et $PSNR(\alpha)$ pour le marquage par schémas 1,2 et 3 de l' image Lena. Contrairement à T et à \hat{R} , le $PSNR$ est constant quelque soit le niveau de résolution du marquage.

TABLE V. RÉSULTATS DE MARQUAGE PAR SCHÉMAS 4 ET 5, NIVEAU DE RÉOLUTION 1 ET BANDES 1,2 ET3 PUIS 2,3 ET 4. LE FACTEUR ALPHA EST FIXÉ À 0.75.

Images	Lena	Lena	Peppers	Peppers	Boat	Boat	Baboon	Baboon
Schéma	4	5	4	5	4	5	4	5
Niveau	1	1	1	1	1	1	1	1
Bandes	1,2,3	2,3,4	1,2,3	2,3,4	1,2,3	2,3,4	1,2,3	2,3,4
Alpha	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Min	-21.0	-16.0	-22.0	-20.0	-21.0	-18.0	-18.0	-17.0
Max	21.0	20.0	23.0	21.0	22.0	19.0	17.0	17.0
PSNR	40.80	41.32	39.09	39.21	39.90	40.37	38.80	38.70
Détection	1	1	1	1	1	1	1	1
T	0.0437	0.0434	0.0687	0.0687	0.0743	0.0740	0.1565	0.1566
Ř	0.9613	0.9335	1.2230	1.0902	1.1975	1.1938	1.2440	1.4675
Ř -T	0.9176	0.8901	1.1543	1.0215	1.1232	1.1198	1.0875	1.311

2-Marquage par résolution directionnelle

Ce type de marquage implique les schémas 6, 7, 8 et 9. Chacun de ces schémas opère sur une seule des 4 directions ou orientations des sous-bandes contourlettes. À chaque marquage, 3 sous-bandes appartenant à la même orientation ou direction fréquentielle sont marquées. Il est important de constater tout de suite que l'ensemble de ces schémas présente l'avantage d'une complexité de calcul moindre par rapport aux autres schéma. En effet, pour chaque marquage, un seul masque de pondération doit être calculé, plus exactement, celui de la direction concernée, faisant ainsi l'économie de calcul de 3 autres masques de pondération. Les résultats prélevés lors des simulations de marquage sur les images de tests portent sur le seuil de décision du détecteur, sa réponse en valeur de corrélation \hat{R} et le PSNR de l'image marquée. La table VI rapporte un exemple de résultats de simulation des schémas de marquage 6,7,8 et 9 obtenus pour plusieurs images.

À l'issue de toutes ces simulations, les conclusions peuvent être résumées comme suit :

- Les Valeurs de PSNR sont élevées et même au dessus de celle des schémas 1,...5
- Les distances ($\hat{R} -T$) sont raisonnables mais moindres par rapport à celles des schémas 1,...5.

Finalement, la marquage dans le sens de la direction fréquentielle présente des performances intéressantes au point de vue de l'invisibilité même si la robustesse est un peu amoindrie en termes de distance ($\hat{R} -T$). Les schémas 6, ...9 sont certainement meilleurs quant à la robustesse vis-à-vis des attaques de destruction puisque la marque est insérée à des niveaux fréquentiels profonds, donc à l'abri des effets d'un filtrage léger.

Les conclusions de la section précédente sur la robustesse du marquage au niveau 3 nous poussent à croire qu'il y a moyen d'améliorer les choses en résolvant le problème posé.

TABLE VI. RÉSULTATS DE MARQUAGE PAR SCHÉMAS 6, 7, 8 ET 9, UNE SEULE DIRECTION FRÉQUENTIELLE ET 3 NIVEAUX DE RÉOLUTION POUR CHAQUE MARQUAGE. LES VALEURS DE PSNR SONT REMARQUABLES.

Image		Lena		Alpha=0.75		Détection =1	
Schéma	6	7	8	9			
Min	-27.0	-31.0	-22.0	-17.0			
Max	24.0	29.0	24.0	21.0			
PSNR	40.82	40.36	41.35	42.63			
T	0.0932	0.0759	0.0832	0.0187			
Ř	0.6354	0.5506	0.5897	0.1435			
Ř-T							

Image		Peppers		Alpha=0.75		Détection =1	
Schéma	6	7	8	9			
Min	-25.0	-26.0	-23.0	-22.0			
Max	23.0	26.0	25.0	28.0			
PSNR	39.34	38.81	39.41	39.72			
T	0.0960	0.0787	0.0902	0.0287			
Ř	0.6953	0.6514	0.6745	0.1849			
Ř-T							

Image		Boat		Alpha=0.75		Détection =1	
Schéma	6	7	8	9			
Min	-31.0	-22.0	-21.0	-17.0			
Max	26.0	26.0	20.0	19.0			
PSNR	39.68	39.81	40.31	41.20			
T	0.1427	0.0968	0.1012	0.0271			
Ř	0.7894	0.6935	0.7103	0.1858			
Ř-T							

Image		Baboon		Alpha=0.75		Détection =1	
Schéma	6	7	8	9			
Min	-20.0	-19.0	-19.0	-21.0			
Max	20.0	23.0	20.0	19.0			
PSNR	39.23	38.87	38.40	38.91			
T	0.1296	0.1062	0.1759	0.0537			
Ř	0.8021	0.7387	0.9305	0.2395			
Ř-T							

3-Marquage par sous-bandes diagonales

Ce type de marquage implique les schémas 10, 11, 12 et 13. Chacun de ces schémas opère sur 3 directions fréquentielles différentes et sur 3 niveaux de résolution différents (voir la table IV). C'est dire qu'on veut tirer profit de la meilleure diversité possible en termes de résolution et d'orientation fréquentielle. Au point de vue de la complexité de calcul, seuls 3 masques de pondération sont requis, ce qui peut être considéré comme un petit gain par rapport au cas des schémas de marquage par résolution 1,...5.

Les résultats prélevés lors des simulations de marquage sur les images de tests portent sur le seuil de décision du détecteur, sa réponse en valeur de corrélation \hat{R} et le PSNR de l'image marquée. La table VII rapporte un exemple de résultats de simulation des schémas de marquage 10,11,12 et 13 obtenus pour plusieurs images.

À l'issue de toutes ces simulations, nous pouvons conclure que les Valeurs de PSNR sont presque similaires à celles des schémas 6,...9. A priori, il n'y a pas vraiment de justification forte pour préférer un de ces schémas par rapport à ceux du groupe 6,...9. La diversification résolution-direction pourrait toutefois constituer un élément motivateur pour pencher à l'un de ces schémas, tout en mettant de coté le gain en temps de calcul qui pourrait être réalisé dans le cas du choix d'un schéma du groupe 6,...9.

TABLE VII. RÉSULTATS DE MARQUAGE PAR SCHÉMAS 10, 11, 12 ET 13, DIRECTIONS ET RÉSOLUTIONS TOUTES DIFFÉRENTES POUR CHAQUE SCHÉMA. LES VALEURS DE PSNR SONT REMARQUABLES.

Image	Lena		Alpha=0.75	Détection =1
Schéma	10	11	12	13
Min	-21.0	-20.0	-26.0	-18.0
Max	21.0	24.0	20.0	21.0
PSNR	40.80	41.30	40.79	41.31
T	0.0854	0.0773	0.0834	0.0178
R	0.5923	0.5685	0.5978	0.1461
R-T				

Image	Peppers		Alpha=0.75	Détection =1
Schéma	10	11	12	13
Alpha	0.75	0.75	0.75	0.75
Min	-22.0	-23.0	-21.0	-20.0
Max	23.0	23.0	20.0	26.0
PSNR	39.09	39.21	39.09	39.24
T	0.0915	0.1027	0.0869	0.0209
R	0.6839	0.6884	0.6748	0.1870
R-T				

Image	Boat		Alpha=0.75	Détection =1
Schéma	10	11	12	13
Min	-21.0	-20.0	-21.0	-18.0
Max	22.0	19.0	21.0	18.0
PSNR	39.90	40.37	39.90	40.38
T	0.1206	0.1140	0.1100	0.0205
R	0.7861	0.6740	0.7647	0.1795
R-T				

Image	Baboon		Alpha=0.75	Détection =1
Schéma	10	11	12	13
Min	-18.0	016.0	-19.0	-17.0
Max	17.0	18.0	18.0	18.0
PSNR	38.80	38.69	38.81	38.69
T	0.1296	0.1576	0.1485	0.0451
R	0.8113	0.8174	0.8569	0.2455
R-T				

IX. Conclusion

Ce document a fait l'objet de la description des tests de performance effectués sur l'algorithme de marquage par contourlettes redondantes. Cet algorithme insère de manière invisible et robuste une marque informative dans les sous-bandes d'une transformée en contourlettes redondantes de l'image à marquer. L'opération d'insertion est adaptative dans le sens qu'elle est guidée par des masques de pondération directionnelle préalablement calculés. Chacun des masques de pondération concerne une seule direction fréquentielle et fournit ainsi toutes les régions significatives adéquates au marquage d'une ou plusieurs sous-bandes de cette direction. Afin d'augmenter la précision du calcul des masques de pondération et de simplifier leur calcul en évitant des opérations d'interpolation, nous avons introduit une nouvelle variante de la transformée en contourlettes que nous avons appelée par transformée en contourlettes redondantes. Celle-ci présente l'avantage de décomposer l'image sous forme de sous-bandes toutes de même taille. Des tests de performance variés et intensifs ont été appliqués à cette technique. Les résultats expérimentaux obtenus nous ont permis de valider cette technique de marquage et de montrer sa supériorité par rapport à une technique similaire mais opérant sur les ondelettes. Par ailleurs, les résultats de performance des schémas de marquage, spécifiant quelles sous-bandes sont marquées, sont en faveur d'un marquage impliquant toutes les résolutions au lieu de se limiter à des sous-bandes issues d'un seul niveau résolution. En effet, ceci permet d'augmenter la robustesse du système par rapport aux attaques intentionnelles ou malicieuses agissant par filtrage, sans pour autant diminuer la qualité visuelle de l'image marquée. Toutefois, les tests de performance ont montré quelques faiblesses de l'algorithme quant à la détection de la marque dans les sous-bandes du niveau de résolution 3. Ceci peut faire l'objet d'une analyse et amélioration dans les travaux futurs.

RÉFÉRENCES

- [1]N. Baaziz, "Adaptive watermarking schemes based on a redundant contourlet transform ." IEEE International Conference On Image Processing, ICIP 2005 Genoa, Italy, September 2005.
- [2]N. Baaziz " Extraction de primitives d'images pour la recherche par le contenu : la transformée en contourlet." Rapport de recherche, UQO, 2004.
- [3]M. Barni, F. Bartolini, and A. Piva, "Improved wavelet based watermarking through pixel-wise masking," *IEEE Trans. Image Proc.*, vol. 10, no. 5, pp. 783-791, May 2001.
- [4]J. Cao, J. Fowler, and N. Younan, "An image-adaptive watermark based on a redundant wavelet transform," *Proc. ICIP*, Thessaloniki, Greece, pp. 277-280, October 2001.
- [5]F. Deguillaume, S. Voloshynovskiy and T. Pun, "Secure hybrid robust watermarking resistant against tampering and copy-attack," *Signal Processing*, 83, 10, pp. 2133-2170, October 2003.
- [6]M. Do and M. Vetterli "Pyramidal directional filter banks and curvelets," *Proc. ICIP*, Thessaloniki, Greece, October 2001.
- [7]M. Do and M. Vetterli "Contourlets: a directional multiresolution image representation," *Proc. ICIP*, Rochester, New York, USA, pp. 357-360, September 2002.
- [8]T.N. Pappas and R.J. Safranek, "Perceptual criteria for image quality evaluation," in *Handbook of Image & Video processing*, pp. 669-684, Academic Press 2000.
- [9]F. A. P. Petitcolas, M. Steinbach, J. Dittmann, C. Fontaine, F. Raynal, and N. Fatès, "A public automated Web-based evaluation service for watermarking schemes: StirMark benchmark," *Proc. SPIE: Security and Watermarking of Multimedia Contents*, vol. 4314, San Jose, CA, USA, pp. 575-584, January 2001.
- [10]C.I. Podilchuk and W. Zeng, "Image adaptive watermarking using visual models," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 525-539, May 1998.
- [11]R.B. Wolfgang, C.I. Podilchuk, and E.J. Delp, "Perceptual watermarks for digital images and video," *Proc. IEEE*, vol. 87, no. 7, pp. 1108-1126, July 1999.

Annexe

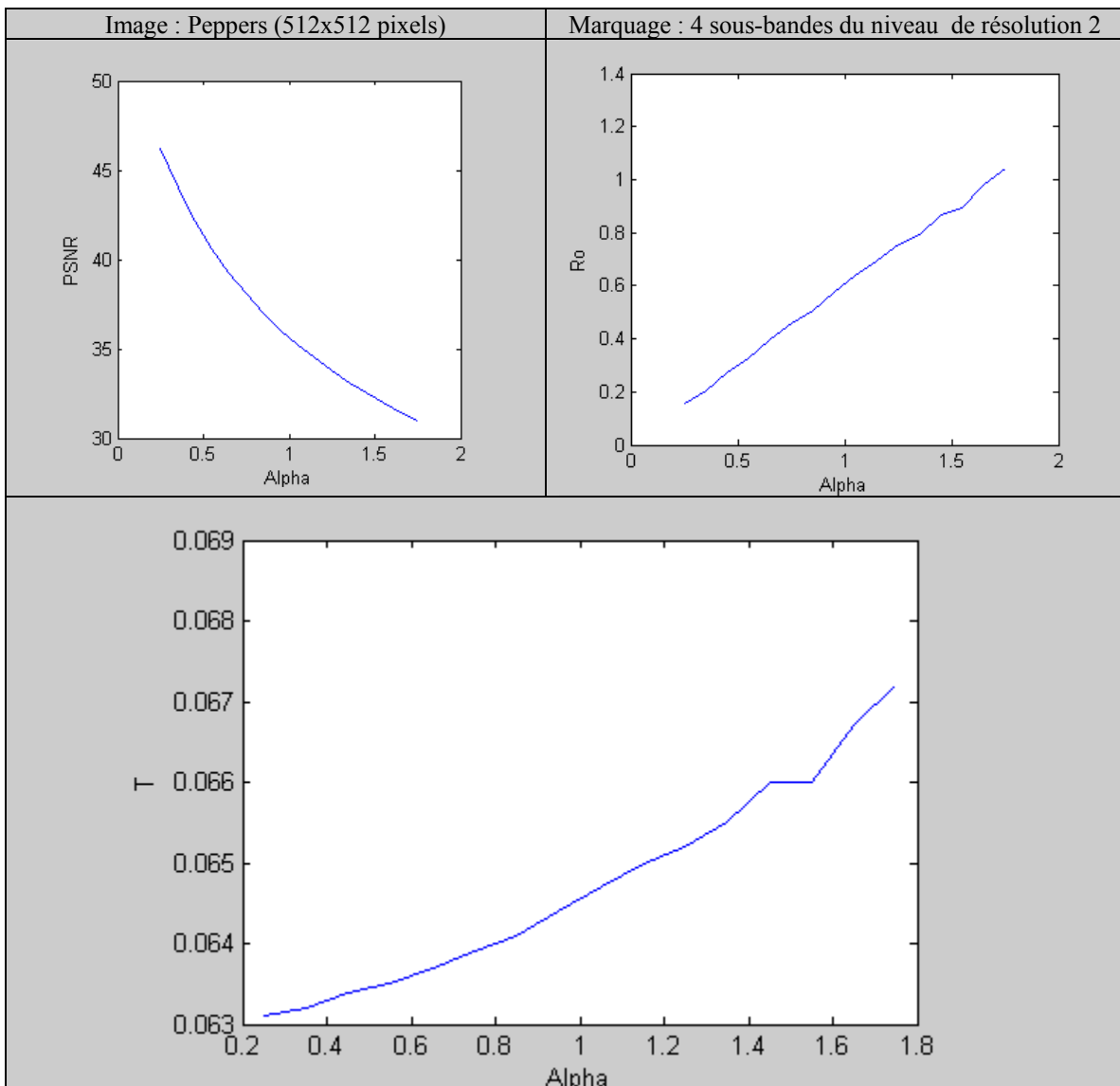


Figure A1. Résultats de marquage ($PSNR$, \hat{R} et T) de l'image Peppers en fonction de la valeur du facteur d'intensité de marquage α (ou alpha). La valeur R_0 indique \hat{R} .

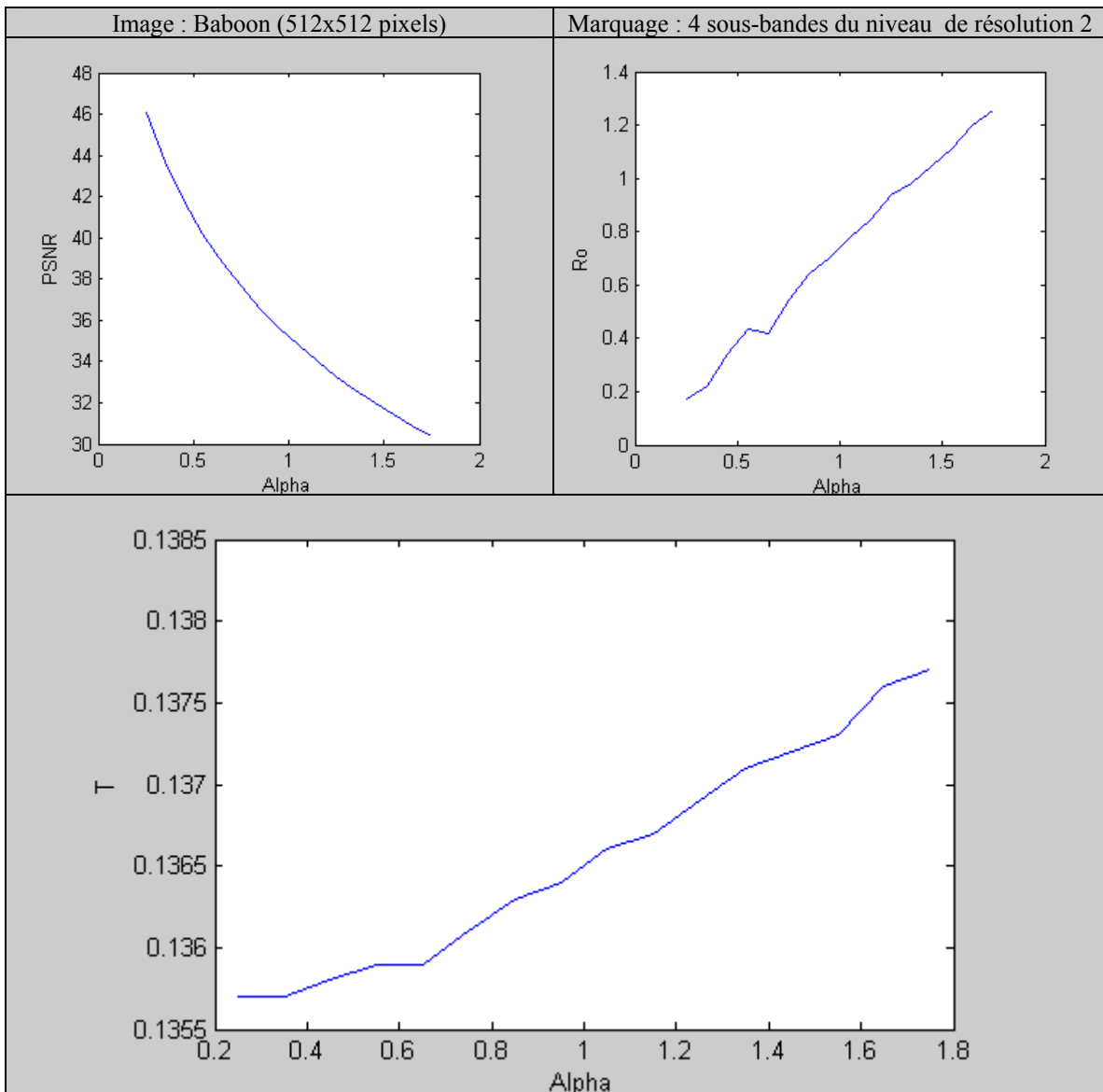


Figure A2. Résultats de marquage ($PSNR$, \hat{R} et T) de l'image Baboon en fonction de la valeur du facteur d'intensité de marquage α (ou alpha). La valeur R_0 indique \hat{R} .

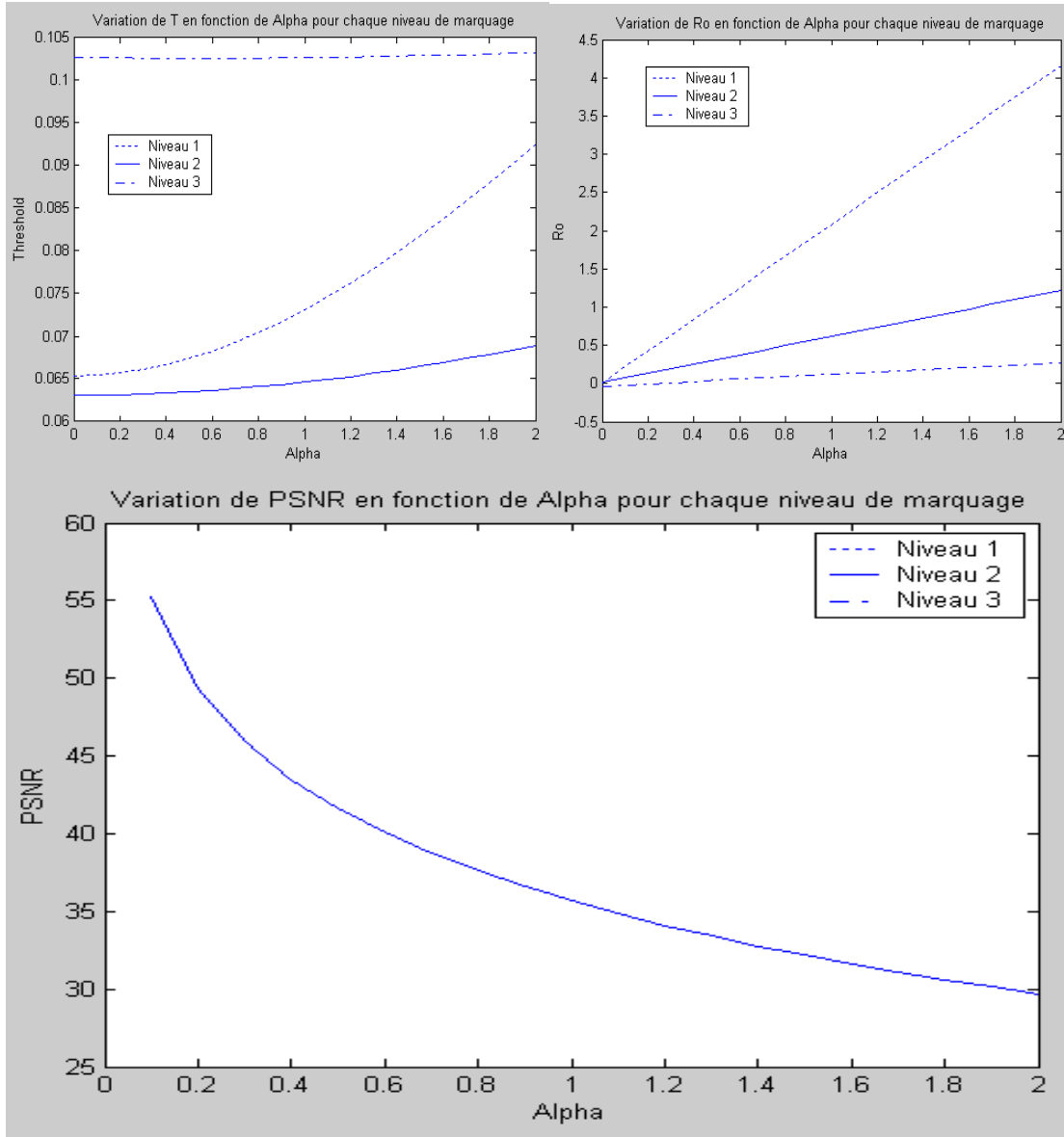


Figure A.3 : Résultats $T(\alpha)$, $\hat{R}(\alpha)$, et $PSNR(\alpha)$ pour le marquage par schémas 1,2 et 3 de l'image Peppers. Contrairement à T et à \hat{R} , le $PSNR$ est constant quelque soit le niveau de résolution du marquage.

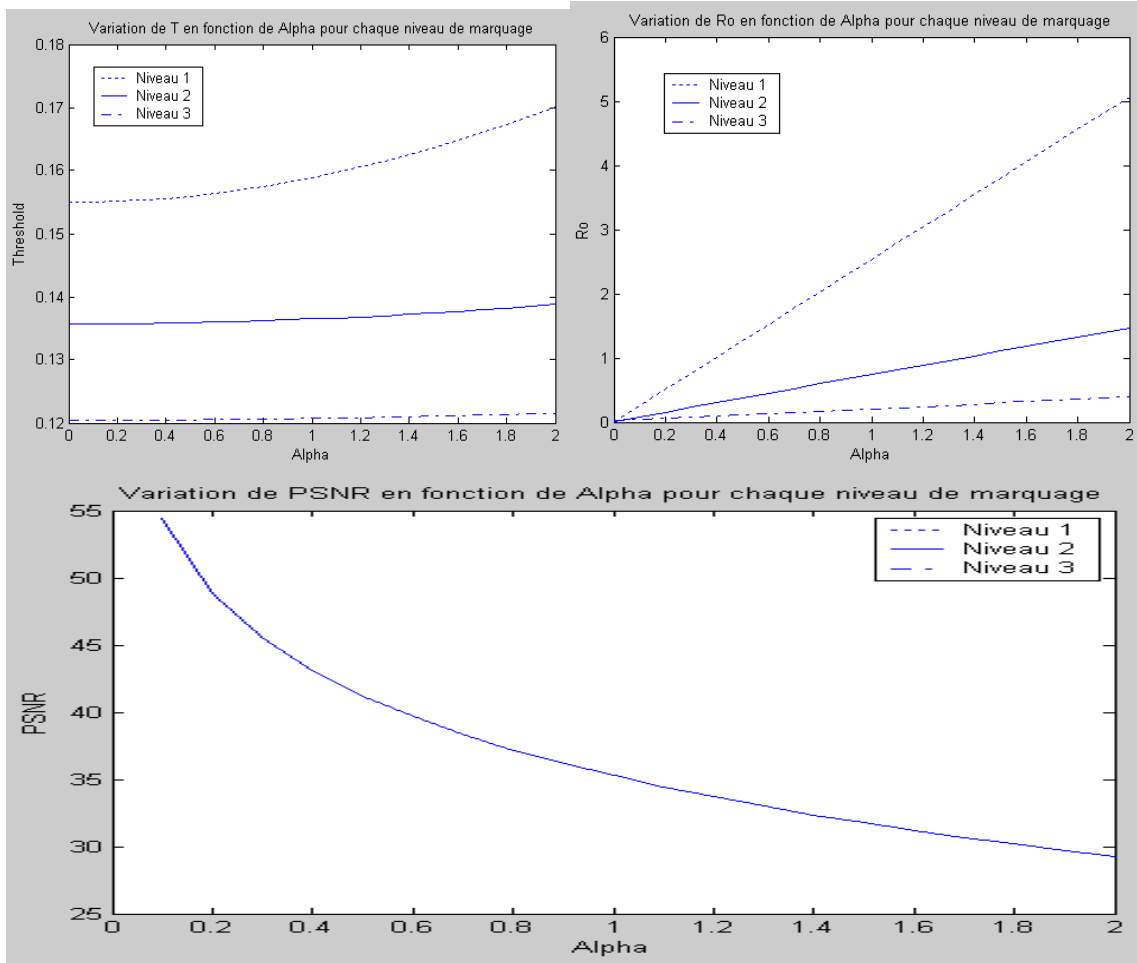


Figure A.4 : Résultats $T(\alpha)$, $\hat{R}(\alpha)$, et $PSNR(\alpha)$ pour le marquage par schémas 1,2 et 3 de l' image Baboon. Contrairement à T et à \hat{R} , le $PSNR$ est constant quelque soit le niveau de résolution du marquage.

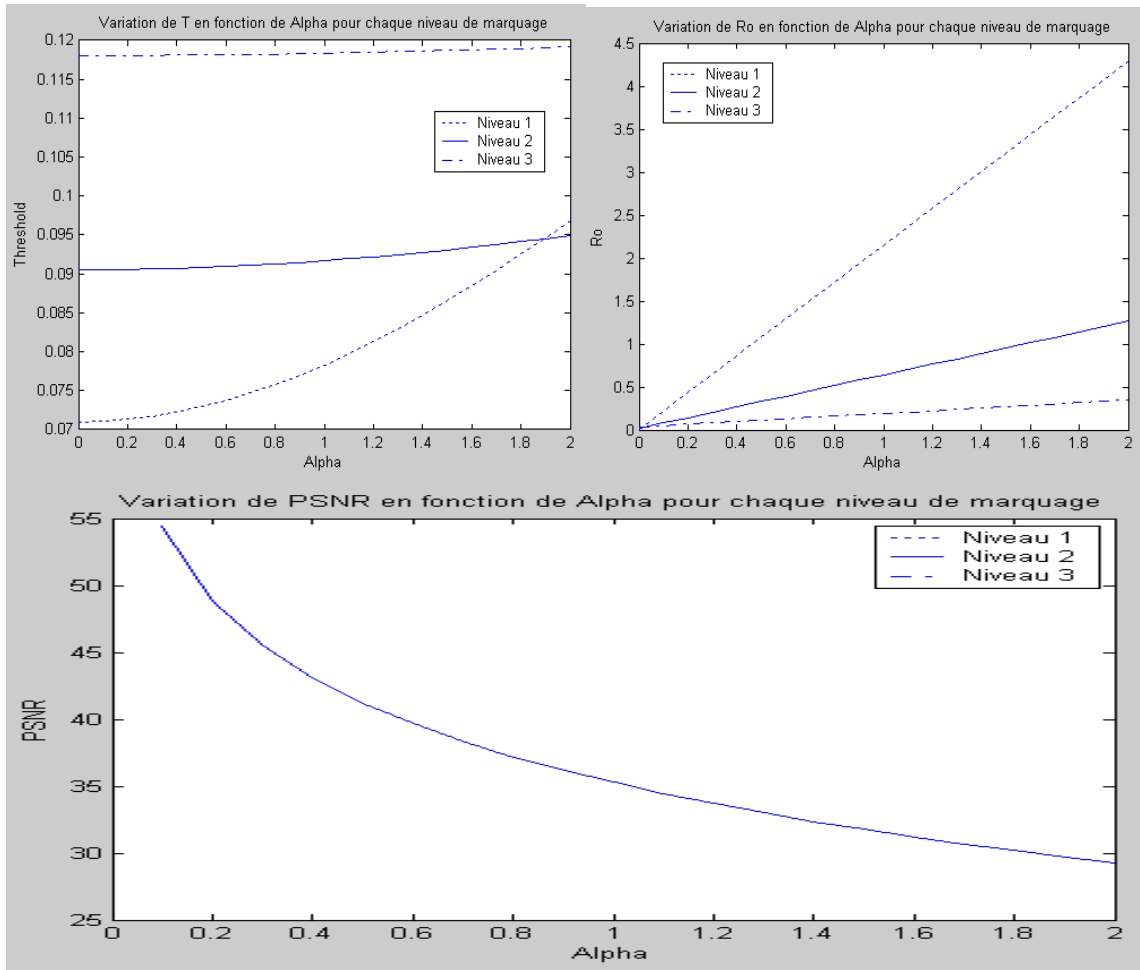


Figure A.5 : Résultats $T(\alpha)$, $\hat{R}(\alpha)$, et $PSNR(\alpha)$ pour le marquage par schémas 1,2 et 3 de l' image Boat. Contrairement à T et à \hat{R} , le $PSNR$ est constant quelque soit le niveau de résolution du marquage.