

Compression d'images d'empreintes digitales avec contrôle de qualité

Zehira HADDAD^{1,2}, Azeddine BEGHADADI¹, Amina SERIR², Anissa MOKRAOUI¹

¹L2TI, institut Galilée, université Paris 13
99 Avenue J. B. Clément 93430 Villetaneuse

²LTIR, Institut d'électronique, USTHB
zehira.haddad@univ-paris13.fr

Résumé

Le stockage de données biométriques, et en particulier les images d'empreintes digitales, pose de sérieux problèmes vu la quantité d'information à gérer et l'importance de la qualité de la conservation des caractéristiques indispensables à l'étape d'identification. Nous proposons alors une méthode de compression d'images d'empreintes digitales qui met l'accent sur la notion de qualité au sens perceptuel et précision dans l'étape d'identification. La méthode de compression proposée est basée sur une nouvelle transformée en ondelettes géométrique très adaptée aux images d'empreintes digitales. Il s'agit de la transformée « wave atoms ». Le schéma de compression proposé ajuste le taux de compression selon la qualité d'images requise pour le bon déroulement de l'étape d'identification. Les performances de cette approche de compression sont alors évaluées via un système d'identification d'images d'empreintes digitales.

Mots clefs

Biométrie, Compression, Empreintes digitales, Identification, Qualité d'image, Transformées en ondelettes géométriques, Wave atoms.

1 Introduction

La biométrie est une technique qui consiste à reconnaître les individus de manière automatique à partir de leurs caractéristiques physiques ou comportementales. Malgré la prolifération continue de nouvelles méthodes biométriques de plus en plus fiables et robustes, l'identification par empreintes digitales reste la méthode la plus utilisée. En effet, en plus de sa fiabilité, l'empreinte digitale est très facile à acquérir. De plus, cette technique biométrique est considérée comme l'une des moins chères en termes de prix de revient. Notons toutefois que l'utilisation croissante de cette technique a engendré des bases de données de plus en plus volumineuses. De ce fait, l'unique solution pour réduire cette grande masse de données à stocker est l'utilisation d'une méthode de compression d'image avec pertes.

La compression d'empreintes digitales a fait l'objet de l'une des premières applications de la transformée en ondelettes, proposée pour le FBI dès le début des années 90. Le standard de compression résultant est connu sous le nom de WSQ [1]. Depuis, plusieurs nouvelles

transformées, beaucoup plus appropriées aux images d'empreintes digitales, ont fait leur apparition. Par conséquent, il semble tout à fait justifié de réviser ce cadre à la lumière des dernières avancées en matière de représentation d'images. De même, le standard actuel de compression d'image JPEG 2000 [2] qui est également basé sur la transformée en ondelette a été conçu pour tous types d'images. Sachant que certaines images présentent des caractéristiques bien spécifiques qui pourraient être mieux analysées et capturées par d'autres transformées plus adaptées. Le but de ce travail est de concevoir un système de compression basée sur la transformée la plus appropriée à l'analyse et à la compression d'images d'empreintes digitale.

Les performances des systèmes et applications basés sur les images d'empreintes digitales sont généralement liées à la bonne détection et à l'extraction des caractéristiques structurales locales de ces images, appelées minuties [3]. La qualité d'image joue alors un rôle important et doit, de ce fait, être prise en compte. De plus, la compression d'images d'empreintes digitales est réalisée généralement juste après la phase d'acquisition, après validation de la qualité d'image acquise pour le stockage dans la base de données. Ce processus se fait au préalable et indépendamment du processus de reconnaissance et d'extraction des minuties. Par conséquent, nous devons utiliser une mesure de qualité qui permet d'ajuster la compression indépendamment de l'extraction des minuties, puisque cela se fait avant et indépendamment de la phase d'identification. Le développement d'une mesure objective de qualité d'image corrélée à l'appréciation visuelle est la solution retenue dans ce travail.

Les mesures de qualité d'images les plus utilisées en compression sont le PSNR et l'EQM. Ces deux métriques sont très simples et adaptées aux applications temps réel telles que le contrôle de qualité du flux vidéo. Toutefois, ces métriques ne sont pas toujours en accord avec l'appréciation visuelle d'un observateur humain. Plusieurs études ont montré que des images présentant des niveaux de dégradation perceptuelle très différents peuvent avoir le même PSNR. En effet, de faibles déformations géométriques peuvent facilement créer une valeur EQM très élevée sans conséquences sur la qualité perceptuelle de l'image. De ce fait, plusieurs recherches ont été dédiées à l'élaboration de méthodes plus efficaces pour évaluer la qualité d'image [4]. Le but étant de chercher des méthodes

plus en accord avec le jugement humain. Généralement, les mesures de qualité d'images sont répertoriées en trois catégories principales selon l'utilisation ou non de l'image originale: les mesures avec référence, les mesures sans référence et celles à référence réduite. Les mesures sans références sont dédiées à un type particulier de dégradations, tandis que les mesures avec référence sont dédiées à tous les types de dégradations. Nous proposons ici, de contrôler la compression à l'aide d'une mesure de qualité avec référence.

De récents travaux ont proposé d'utiliser ces mesures de qualité d'image pour contrôler les performances de compression. Citons par exemple les travaux concernant le contrôle de la distorsion visuelle dans la compression JPEG2000 [5]. Cette approche est basée sur l'utilisation d'un modèle de vision qui prend en compte différents effets de masquage reflétant le comportement du système visuel humain. Ainsi, la mesure proposée comprend un ensemble d'erreurs spatiales et fréquentielles. Les résultats obtenus montrent que l'incorporation d'un modèle représentant le fonctionnement du système visuel humain dans la compression JPEG2000 améliore de façon significative cette norme.

L'objectif de ce travail est donc de développer une mesure de fidélité qui soit la plus corrélée possible à l'appréciation visuelle. Cela permet d'adapter le taux de compression à la qualité d'image en contrôlant le niveau des éventuelles dégradations qui pourraient altérer le processus de reconnaissance. Ainsi, la combinaison d'une nouvelle méthode de compression plus spécifique à un type particulier d'images et d'une mesure de qualité fiable qui reflète l'appréciation visuelle humaine, permettra la conception d'un système d'encodage adaptatif approprié aux images d'empreintes digitales offrant un contrôle de la distorsion visuelle.

Cet article est organisé comme suit. Dans la section 2, nous présentons la transformée wave atoms. Nous décrivons dans la section 3 le schéma de compression adaptatif proposé, en s'intéressant d'abord au bloc de compression, puis à la mesure de qualité d'image proposée et au final à la stratégie de contrôle de la distorsion dans le schéma de compression. La section 4 est dédiée à la présentation et à la discussion des résultats obtenus. Finalement, la section 5 présente une conclusion du travail effectué.

2 La transformée wave atoms

En traitement d'image, les ondelettes s'utilisent de manière séparable sur l'axe horizontal et l'axe vertical. Ce qui engendre une décorrélation partielle de l'image donnant de nombreux coefficients de forte énergie le long des contours. C'est ainsi que de nouvelles transformées plus adaptées à la représentation des courbes et des contours dans une image, ont été proposées [6]. Ces transformées sont connues sous le nom de transformées en ondelettes géométriques.

Une image d'empreinte digitale peut être caractérisée par un ensemble de courbes représentant les dessins de l'épiderme. Pour notre application, nous avons donc préféré à la transformée en ondelettes, de nouvelles transformées nécessitant moins d'informations pour représenter les courbes, autrement dit moins de coefficients nécessaires pour les représenter. Les transformées en ondelettes géométriques semblent répondre de façon satisfaisante à cet objectif [6].

Notons également qu'une des caractéristiques les plus importantes dans une image d'empreinte digitale est l'aspect oscillatoire des courbes qui la représentent. En effet, le niveau de gris le long des courbes de l'épiderme varie entre un niveau maximum correspondant au point d'appui avec le capteur et un niveau minimum correspondant au point où il n'y a aucun contact avec le capteur. Ainsi, la variation du niveau de gris le long des courbes de l'épiderme a une forme oscillatoire.

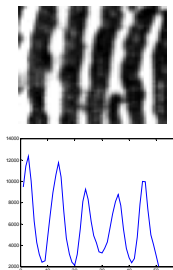


Figure 1 – Structure oscillatoire d'une empreinte digitale.

La transformée wave atoms est une transformée en ondelettes géométrique qui a été développée par Demanet [7] et a été établie comme étant la transformée en ondelette géométrique qui offre la représentation la plus parcimonieuse des images contenant des structures oscillatoires. Pour mieux comprendre et situer la transformée wave atoms parmi les transformées géométriques existantes, nous nous basons sur l'analyse donnée par Demanet dans [7]. Soit α le paramètre représentant l'aspect multiéchelle d'une transformée et β le paramètre représentant son aspect directionnel, avec $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$.

La figure 2 représente la répartition des transformées selon leurs aspects multiéchelle et multidirectionnel.

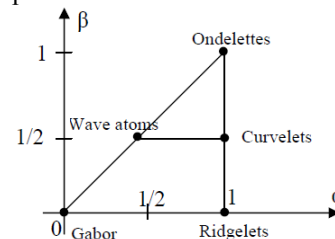


Figure 2 – Diagram (α, β) de quelques transformées.

Lorsque $\alpha=0$, la transformée n'est pas multiéchelle, tel est le cas de la transformée de Gabor. Lorsque $\alpha=1$, la transformée est multiéchelle, c'est le cas des ondelettes,

des ridgelets et des curvelets. De même, lorsque $\beta=0$, la transformée présente une sélectivité maximale comme la transformée de Gabor où la décomposition peut se faire selon toutes les directions possibles. Tandis que $\beta=1$ représente une sélectivité minimale, c'est le cas des ondelettes où il y a très peu d'information directionnelle (trois profils : horizontal, vertical et diagonal).

Dans ce contexte, la transformée wave atoms se situe dans le cas où $\alpha=\beta=1/2$. Cette transformée est autant multiéchelle que multidirectionnelle. Elle représente ainsi le compromis entre les deux propriétés en possédant les deux au même degré.

Wave atoms [7] est noté comme une fonction $\varphi_\mu(x)$, où le paramètre $\mu=(j,m,n)=(j,m_1,m_2,n_1,n_2)$. Les indexes j,m_1,m_2,n_1,n_2 sont des entiers associés au point (x_μ,ω_μ) dans le domaine espace-phase défini comme suit:

$$x_\mu = 2^{-j} n, \quad \omega_\mu = \pi 2^j m, \quad C_1 2^j \leq \max_{i=1,2} |m_i| \leq C_2 2^j \quad (1)$$

La figure 3-a présente l'arbre de décomposition correspondant à la transformée wave atom définissant le partitionnement de l'axe des fréquences en 1D. Les labels "LH", et "RH" correspondent respectivement à fenêtre gauche et fenêtre droite, tandis que la profondeur j correspond à la fréquence 2^{2j} . La Figure 3-b représente l'arbre de décomposition de la transformée wave atoms en 2D. Lorsque l'échelle j augmente de 1, la taille des carrés devient double. A chaque échelle, les carrés sont indexés par m_1, m_2 . Le point bleu correspond au changement d'échelle de la figure 3-a.

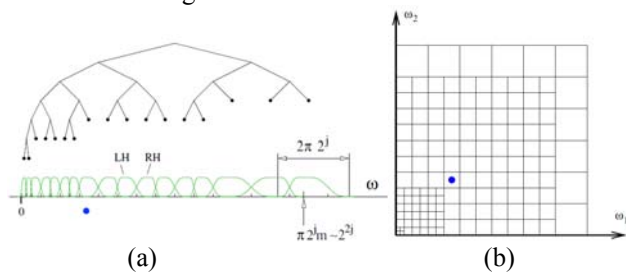


Figure 3 – Arbre de décomposition de la transformée wave atoms dans le cas (a) 1D et dans le cas (b) 2D.

3 L'approche de compression proposée

L'approche de compression proposée est présentée dans la figure 4. Nous allons à présent décrire cette approche en présentant les différentes étapes ou blocs qui la composent.

3.1 Blocs : compression/ décompression

Dans nos précédant travaux [8], nous avons montré que la transformée wave atoms était parmi les transformées en ondelettes géométriques, la plus approprié pour la compression des images d'empreintes digitales. Nous proposons ici une nouvelle approche de compression

basée sur la transformée wave atoms qui utilise une quantification scalaire adaptative pour chaque sous bande. Nous proposons alors que la largeur des intervalles de quantification soit inversement proportionnelle au logarithme de la variance de la sous bande.

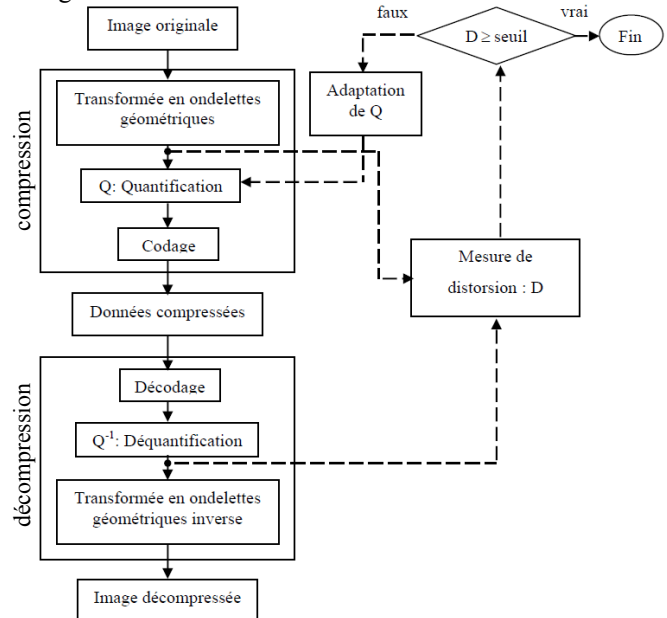


Figure 4 – Schéma bloc descriptif de l'approche de compression adaptative proposée.

La largeur de l'intervalle noté Δ_i de la sous bande s_i est déterminée à partir de la relation suivante :

$$\alpha \Delta_i = \beta_i / \log(\text{var}(s_i)) \quad (2)$$

$\text{var}(s_i)$ représente la variance de la sous bande s_i .

β_i est le coefficient multiplicatif correspondant à la sous bande s_i .

α représente le coefficient multiplicatif qui est un scalaire fixé en fonction du taux de compression fixé.

Pour chaque sous bande, le quantificateur est un quantificateur scalaire uniforme à zone morte, puisque tous les intervalles sont égaux sauf l'intervalle du milieu centré à 0 qui est 40% plus grand que les autres intervalles. Notons que la distribution des coefficients nous a permis également de fixer la valeur de la position de reconstruction de chaque représentant d'intervalle, qui sera non pas au point milieu de chaque intervalle, mais à une distance 0.56.

En ce qui concerne la partie codage, nous utilisons un codage de type RLE combiné à Huffman. Le codage RLE est appliqué pour coder la séquence de 0. Puis, les longueurs de séquences et les valeurs restantes sont codées via le codage d'Huffman. Notons qu'il s'agit là de montrer l'efficacité de la transformée « wave atom » dans le cas des images d'empreintes digitales et que nous nous sommes limités à des méthodes de compression sans perte classiques dans la phase finale de codage en suivant la même approche que WSQ. La décompression se fait en

appliquant l'opération inverse de chaque étape transformée, quantification et codage.

La quantification des coefficients issus de l'étape de transformée va être contrôlée ou ajustée via une mesure de qualité d'image basée sur la même transformée (la transformée wave atom).

3.2 Bloc mesure de distorsion

Avant d'introduire le module « mesure de distorsion », il convient de préciser qu'il ne s'agit nullement de se focaliser sur la qualité d'image au sens le plus général. Il est bien établi que la qualité perceptuelle influence indirectement l'étape d'identification. Ici, nous mettons l'accent sur la qualité perceptuelle pour d'une part comparer la méthode proposée aux autres standards de compression, et d'autre part pour contrôler le pas de quantification.

Nous avons présenté la mesure de distorsion proposée dans nos précédents travaux publiés dans [9]. Par souci de compréhension, nous rappelons brièvement dans ce qui suit, les principales étapes de calcul de cette mesure:

Tout d'abord, l'image originale et l'image dégradée sont toutes les deux décomposées via la transformée wave atoms. Ce qui engendre les coefficients $c_{l,o}^R(i,j)$ et $c_{l,o}^D(i,j)$, respectivement. l représente l'échelle et o l'orientation.

Puis, un masquage perceptuel comprenant un masquage de contraste et un masquage d'entropie, est appliqué à ces coefficients. Pour cela, un seuil de visibilité $S_{l,o}(i,j)$ est calculé pour chaque point (i,j) , d'échelle l et d'orientation o , selon la formule suivante:

$$S_{l,o}(i,j) = (1 + (p_1 \cdot (p_2 \cdot |c_{l,o}(i,j)|)^{A+\Delta a(i,j)})^b)^{1/b} \quad (3)$$

$a(i,j) = A + \Delta a(i,j)$ représente la pente de l'asymptote du masquage de contraste selon le voisinage. $\Delta a(i,j)$ est calculé à partir de l'entropie du voisinage de l'image comme suit:

$$\Delta a(i,j) = b_1 / (1 + e^{-b_2(E(i,j) - b_3)}) \quad (4)$$

$$E(i,j) = -\sum \text{prob}(i,j) \log(\text{prob}(i,j)) \quad (5)$$

$E(i,j)$ est la carte entropie associée à la probabilité $\text{prob}(i,j)$ déduite de l'histogramme de luminance au voisinage du point (i,j) .

b_1, b_2, b_3, p_1, p_2 et b sont des paramètres ajustables. Les valeurs des paramètres utilisés dans ce travail sont:

$$b_1 = 0.3, \quad b_2 = 2, \quad b_3 = 1, \quad p_1 = p_2 = 1, \quad b = 2, \quad A = 0.65$$

Après cette étape, une normalisation des erreurs par rapport à ces seuils est effectuée comme suit:

$$Er_{l,o}(i,j) = |c_{l,o}^R - c_{l,o}^D| / \max(S_{l,o}^R(i,j), S_{l,o}^D(i,j)) \quad (6)$$

Dans le but d'extraire une seule valeur représentant le niveau de distorsion de l'image, nous combinons les différentes informations de chaque emplacement, échelle et orientation en effectuant une moyenne:

$$Er_{l,o} = \left(\frac{1}{I_{l,o} \cdot J_{l,o}} \sum_{i=1}^{I_{l,o}} \sum_{j=1}^{J_{l,o}} (Er_{l,o}(i,j))^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$Er = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left(\frac{1}{O_l} \sum_{o=1}^{O_l} Er_{l,o} \right) \quad (8)$$

Enfin, la mesure de distorsion proposée basée sur la transformée wave atoms est donnée par:

$$D = \log_{10}(Er + 1) \quad (9)$$

3.3 Contrôle du taux de compression via la mesure de distorsion

Le contrôle du taux de compression proposé se fait en activant une boucle retour qui modifie les données de l'étape de quantification. En effet, l'étape de quantification est l'étape dans laquelle s'effectue la perte d'information. Il semble donc évident de régler le taux de compression via une modification des données de cette étape. Ces données représentent le nombre d'intervalles de quantification utilisés. Nous proposons donc de modifier ce nombre et de le contrôler via la mesure de distorsion proposée D .

Rappelons que la mesure de qualité proposée est une estimation du niveau de dégradation des images. Plus la valeur D est faible, meilleure est la qualité d'image. Plus la valeur D est élevée, moins bonne est la qualité d'image.

La détermination du seuil contrôlant la qualité d'image est fonction du type d'approche d'identification utilisée. Une fois ce seuil fixé, le contrôle de qualité d'une image d'empreinte digitale compressée se fait comme suit. Si l'image compressée présente une valeur D supérieure à ce seuil, on augmente le nombre d'intervalles de quantification, (par conséquent l'étendue de la zone morte diminue). Si par contre, l'image compressée présente une valeur D inférieure à ce seuil, on diminue le nombre d'intervalles de quantification (par conséquent l'étendue de la zone morte augmente). Ce test est réitéré jusqu'à ce que la qualité d'image souhaitée soit atteinte.

Notons que dans ce cas particulier de compression d'images d'empreintes digitales pour un but de stockage, les performances en termes de temps de calcul ne sont pas très importantes, étant donné que la compression se fait hors ligne lors du stockage dans la base de données.

4 Résultats expérimentaux

Afin de faire une première validation de l'approche de compression proposée, nous traçons les courbes débit-distorsion et nous les comparons à d'autres standards et normes de compression tels que JPEG2000, WSQ et au codeur SPIHT. Les courbes débit-distorsion sont tracées en utilisant le PSNR classique (figure 5). Puis, en utilisant la mesure de distorsion D proposée (figure 6).

La figure 5 montre que le PSNR le plus élevé correspond à la compression wave atoms proposée. De même, la figure 6 montre que les plus faibles distorsions correspondent à la compression proposée. Nous observons également dans la figure 5, un conflit entre la méthode de compression proposée et Spiht et ce, contrairement à ce que nous pouvons observer dans la figure 6. En analysant les images d'empreintes digitales compressées (figure 7), nous constatons que les résultats donnés par la figure 6

sont beaucoup plus significatifs et justes que ceux donnés par la figure 5. Ceci s'explique par le fait que la mesure de qualité proposée est beaucoup plus proche de l'appréciation visuelle que le PSNR étant donné qu'elle s'inspire du fonctionnement du système visuel humain. Ces résultats confirment nos précédents résultats de [9].

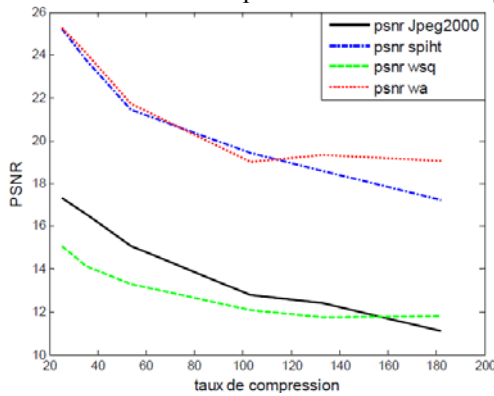


Figure 5 – Courbes débit-distorsion utilisant le PSNR.

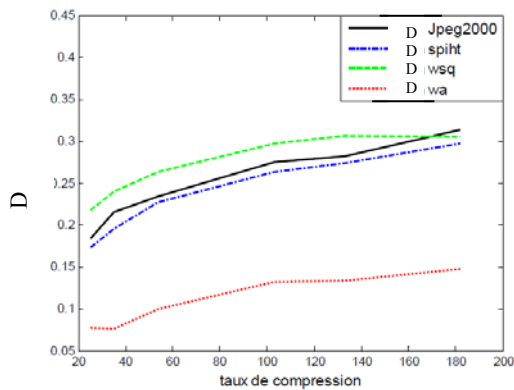


Figure 6 – Courbe débit-distorsion utilisant la mesure de qualité proposée.

Les images de la figure 7 correspondant à la compression proposée ne présentent aucune dégradation visible jusqu'à un taux de compression de 103 :1. A partir de ce taux, un très léger effet de lissage est observé. Néanmoins ce lissage ne peut affecter le processus de reconnaissance puisque la structure des crêtes et des vallées est bien conservée. Par ailleurs, les images compressées avec les autres méthodes utilisées présentent un flou et une détérioration complète de certaines zones de l'image.

L'étape ultime de toute technique biométrique étant l'étape d'identification, nous l'utilisons comme moyen d'évaluation et de validation de la compression proposée. Pour cela, nous utilisons la base de données DB1 set B de la compétition internationale FCV2004 [10], [3]. Cette base de données contient 80 images appartenant à 8 individus et correspondant à 10 acquisitions différentes pour chaque individu.

Etant donné que l'identification à partir des minuties reste la méthode la plus répandue, nous choisissons d'utiliser

pour cette évaluation un système d'identification basé sur ce principe. Ce système est le système AOV [11].

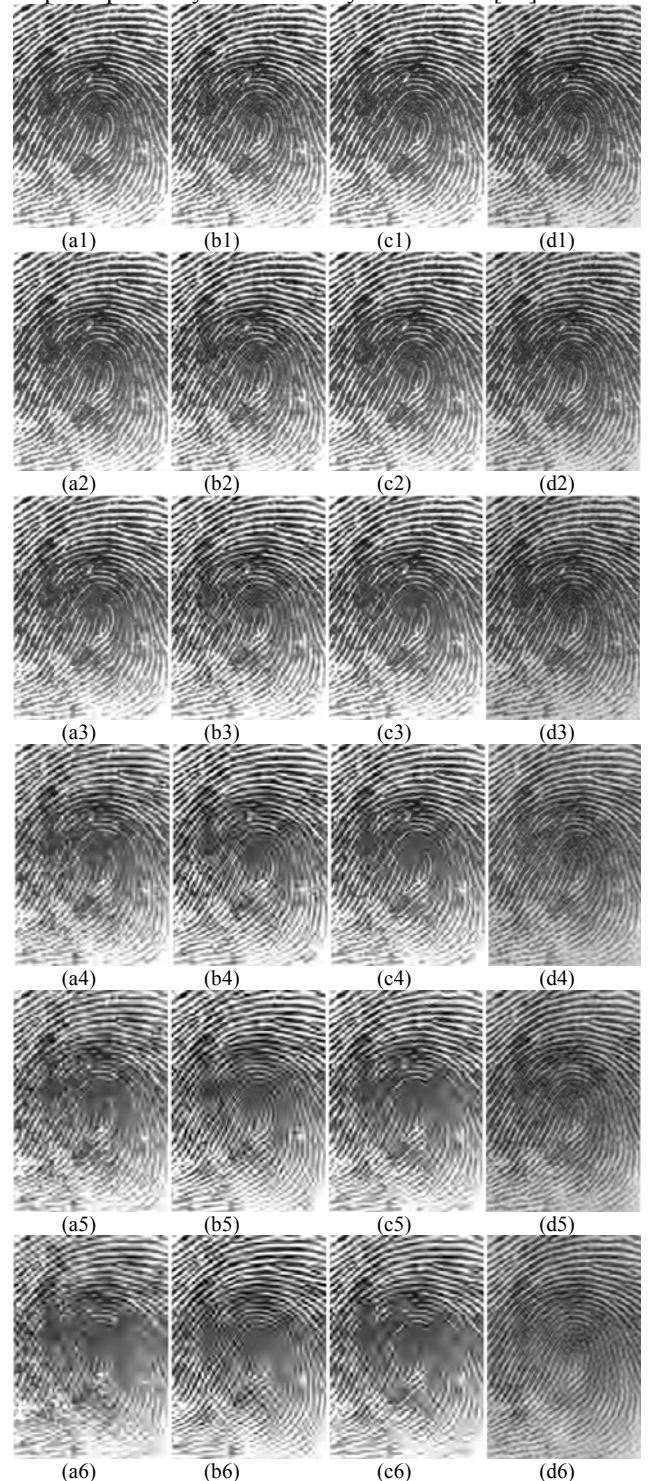


Figure 7 – Images compressées avec: (a) JPEG2000, (b) WSQ, (c) Spihit et (d) la compression wave atoms proposée, aux différents taux de compression (1) 25:1, (2) 35:1, (3) 54:1, (4) 103:1, (5) 133:1 et (6) 182:1.

L'approche utilisée pour la validation de la méthode consiste à compresser avec différents taux. Puis, de voir à

partir de quel taux de compression, les dégradations sont si importantes que le processus d'identification échoue. Pour chaque individu de la base, une image correspondant à son empreinte est tirée aléatoirement. Puis, cette image est comparée au reste des images de la base de données. Les résultats obtenus sont comparés à JPEG2000, WSQ et Spiht. La figure 8 représente le taux de bonne identification obtenu en fonction du taux de compression pour les images de la base de données. Les résultats obtenus montrent que le système d'identification utilisant les images compressées via la méthode wave atoms proposée réussit une identification sans faute jusqu'à un taux de compression moyen de 133:1. Par contre les systèmes d'identification résultant d'autres techniques connues de compression échouent à partir des taux de supérieurs à 103:1.

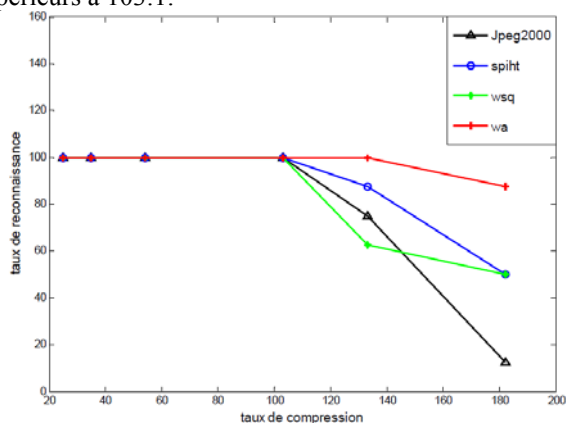


Figure 8 – Taux de reconnaissance moyen en fonction du taux de compression.

Ces résultats montrent aussi la concordance avec les courbes débit-distorsion utilisant la mesure de qualité proposée (figure 6). En effet, l'ordre des performances des méthodes de compression est le même. De plus, nous constatons que JPEG 2000 donne de meilleurs résultats que WSQ, sauf pour le taux 1:182, où WSQ est meilleur. Ce résultat est aussi cohérent avec le résultat observé dans la figure 6. Ces résultats prouvent que la mesure de qualité proposée est bien corrélée et tout à fait en accord avec le taux d'identification.

Les expériences effectuées ont montré qu'à un seuil de distorsion $D=0,14$, le taux de compression peut varier de 131:1 à 149:1 selon les différentes images d'empreintes testées dans la base de données.

5 Conclusion

Cet article présente un système de compression orienté identification. Ce système est basé sur une transformée en ondelettes géométrique adaptée aux images d'empreintes digitales. L'utilisation de cette transformée aussi bien pour la compression que pour la mesure de qualité d'image a permis de concevoir un système de compression adapté garantissant une qualité acceptable pour l'identification.

Les résultats obtenus ont montré que la combinaison d'une approche de compression adaptée aux images d'empreintes digitales et d'une mesure de qualité d'image fiable reflétant l'appréciation visuelle, permet de concevoir un système de compression approprié avec un bon contrôle de la distorsion perceptuelle. L'approche de compression proposée a été finalement validée via un système de reconnaissance. Les résultats obtenus montrent les performances de cette compression comparée à d'autres normes et méthodes de compression connues tels que JPEG2000, WSQ et Spiht.

Comme perspectives, il serait intéressant de renforcer le lien entre la métrique et la compression en déterminant en plus du nombre d'intervalle de quantification global, celui pour chaque sous bande. Ceci permettra d'améliorer ce qu'on a proposé en se basant sur la variance.

Références

- [1] D. Salomon, *Data compression*, the complete reference, Fourth edition, Springer, 2007.
- [2] D. S. Taubman, M. W. Marcellin, JPEG 2000: Image Compression Fundamentals, Standards, and Practice, New York: *Kluwer International Series in Engineering and Computer Science*, Nov. 2001.
- [3] D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, S. Prabhakar, Handbook of fingerprint recognition, Springer, London, 2009.
- [4] "Special Issue on Image Quality Assessment," *Signal Processing*, vol 70, 1998.
- [5] Zhen Liu; Karam, L.J.; Watson, A.B. "JPEG2000 encoding with perceptual distortion control," *IEEE transactions on image processing*; vol. 15; issue. 7, pp. 1763-1778, July 2006.
- [6] F. Friedrich H. Führ, L. Demaret, "Beyond wavelets: New image representation paradigms," Survey article in *document and image compression*, M. Barni and F. Bartolini (eds), pp. 179-206, May 2006.
- [7] Demanet, L. Ying, "Wave atom and sparsity of oscillatory patterns," *Appl. Comput*, vol. 23, Issue 3, pp. 368-387, 2007.
- [8] Z. Haddad, A. Beghdadi, A. Serir, A. Mokraoui, "A new fingerprint image compression based on wave atoms transform," *ISSPIT 2009*, pp. 89-94, Ajman, December, 14-17, 2009.
- [9] Z. Haddad, A. Beghdadi, A. Serir, A. Mokraoui, Image quality assessment based on wave atoms transform, *ICIP 2010*, September 2010, Hong Kong.
- [10] <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/>
- [11] G. S. Ng, X. Tong, X. Tang, D. Shi, "Adjacent orientation vector based fingerprint minutiae matching system", *ICPR2004*, vol. 1, pp.528-531, 2004.