

pixels répartis dans une image, alors la moyenne des différences de luminance entre les pixels de A et ceux de B est très proche de 0. Dans ce tatouage, on choisit des ensembles A et B (suivant une clé secrète), puis on modifie leur luminance : on augmente celle des pixels de A d'une quantité c , et l'on diminue celle des pixels de B de la même quantité c .

Pour vérifier la provenance de l'image, on détermine les ensembles A et B à l'aide de la clé, puis on mesure la moyenne des différences de luminance des pixels. On obtient une moyenne proche de $2c$ si l'image a été tatouée avec la clé, une moyenne proche de 0 sinon. Ce type de filigrane résiste mieux que le précédent à certaines manipulations de l'image, mais, hélas, il n'est toujours pas satisfaisant face à une compression JPEG (remarquons cependant que les modifications des propriétés statistiques d'ensembles de pixels, ou de coefficients, sont souvent utilisées et peuvent donner des filigranes résistants).

LA COMPRESSION

Revenons sur le principe de la compression JPEG : les trois composantes de luminance et de chrominance sont traitées séparément et de la même manière. Une composante de l'image numérisée est découpée en blocs contigus de taille 8×8 , soit 64 pixels (si l'image n'a pas une taille adéquate, elle est complétée par des octets nuls) et l'on applique une transformée de Fourier bidimensionnelle (voir la figure 3) : on obtient ainsi 64 coefficients de Fourier qui correspondent à 64 paires d'orientation et de fréquence différentes. On modifie ensuite les coefficients correspondant aux hautes fréquences, modification d'autant plus importante que l'on accepte une diminution de la résolution. On effectue ensuite la transformation de Fourier inverse pour retrouver un bloc image de 8×8 pixels.

Les octets de luminance ont été changés et leur bit de poids faible, sensible à la moindre variation, a pris une valeur aléatoire : c'est pour cette raison que toute technique de tatouage reposant sur la valeur des bits de poids faible est mise en défaut par une compression JPEG.

Afin d'être sûrs de créer un filigrane résistant à la compression JPEG, E. Koch et J. Zhao, travaillant au *Franhofer Institute for Computer Graphics*, à Darmstadt, ont décidé, en 1995, de mettre au point un algorithme de tatouage qui tient compte de l'algorithme de compression JPEG. On ne peut cacher l'information dans les coefficients de Fourier de haute fréquence car ceux-ci sont modifiés lors de la compression ; on ne peut, non plus, changer les coefficients de basse fréquence qui se

4. AUTOCORRÉLATION DES SUITES

Une technique de tatouage consiste à disposer dans l'image une suite de bits de façon qu'elle soit clairement identifiable. Pour cela il importe que la fonction d'autocorrélation, que nous allons examiner, soit de valeur élevée, et que les fonctions de corrélation avec des suites décalées soient faibles. Examinons deux suites où chaque terme est égal à +1 ou -1 : la corrélation de ces deux suites est égale au nombre de fois où deux chiffres de même rang coïncident, moins le nombre de fois où ils diffèrent, c'est-à-dire à la somme des produits des termes de même rang.

$$\begin{array}{rcccl} \text{Suite 1} & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ \text{Suite 2} & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \text{Corrélation} & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 = 3 - 2 = 1 \end{array}$$

L'autocorrélation d'une suite est mesurée par toutes les corrélations entre cette suite et ses versions décalées (permutations circulaires).

Suite initiale	1	-1	1	1	-1	Corrélation : 5 - 0 = 5
Suite décalée de 1	-1	1	-1	1	1	Corrélation : 1 - 4 = -3
Suite décalée de 2	1	-1	1	-1	1	Corrélation : 3 - 2 = 1
Suite décalée de 3	1	1	-1	1	-1	Corrélation : 3 - 2 = 1
Suite décalée de 4	-1	1	1	-1	1	Corrélation : 1 - 4 = -3
Suite décalée de 5 = suite initiale						

Une suite, dite M-séquence, présente une autocorrélation optimale (un pic très net, et les autres valeurs presque nulles) :

Suite initiale	-1	-1	1	-1	1	1	1	Corrélation : 7 - 0 = 7
Suite décalée de 1	1	-1	-1	1	-1	1	1	Corrélation : 3 - 4 = -1
Suite décalée de 2	1	1	-1	-1	1	-1	1	Corrélation : 3 - 4 = -1
Suite décalée de 3	1	1	1	-1	-1	1	-1	Corrélation : 3 - 4 = -1
Suite décalée de 4	-1	1	1	1	-1	-1	1	Corrélation : 3 - 4 = -1
Suite décalée de 5	1	-1	1	1	1	-1	-1	Corrélation : 3 - 4 = -1
Suite décalée de 6	-1	1	-1	1	1	1	-1	Corrélation : 3 - 4 = -1

De telles suites sont très utilisées en télécommunications. Ici, elles vont servir de structures de référence et seront garantes de la présence du tatouage.

traduisent sur l'image par des zones homogènes où toute modification est visible. Aussi les chercheurs changent-ils, selon une règle préétablie, les valeurs des coefficients de Fourier, pour des fréquences moyennes. Les blocs 8×8 ainsi transformés sont déterminés par la clé secrète. Le filigrane enfoui dans l'image résiste alors bien à une compression JPEG ; il est néanmoins très vulnérable aux manipulations géométriques et à l'impression/renumérisation.

LE PIC CACHÉ

Nous l'avons vu, l'objectif du tatouage est de transmettre une information à travers un support (l'image), bien que cette image subisse des transformations. Il est alors naturel d'utiliser des techniques qui ont fait leurs preuves dans les télécommunications. L'exemple le plus flagrant que nous allons examiner est celui de l'étalement de spectre. L'idée est de plaquer sur l'image un signal bidimensionnel ressemblant à une tôle ondulée ; la transformée de Fourier de ce signal a la forme d'un pic centré autour de la fréquence d'ondulation et décroît fortement autour

de ce pic. La clé est la structure de la tôle, c'est-à-dire sa fréquence spatiale et la direction d'ondulation.

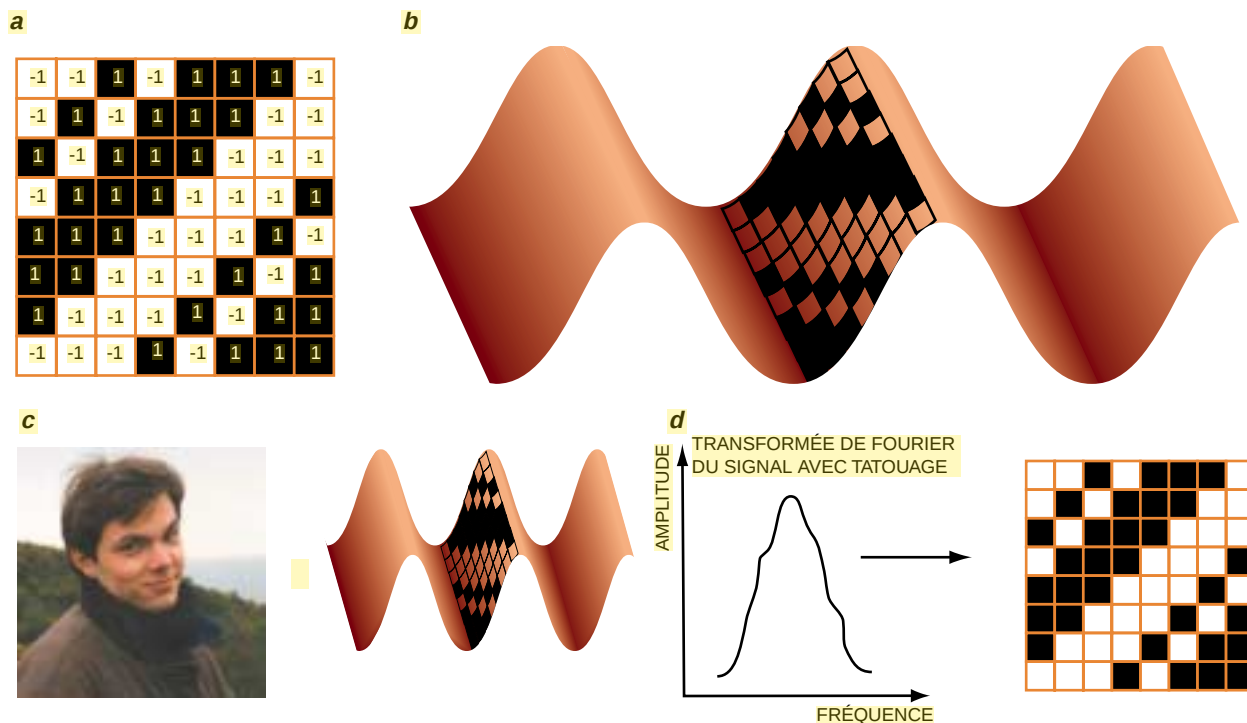
Imaginons maintenant que vous désiriez prouver la provenance d'une image tatouée, en l'absence de l'image originale. Vous prenez la transformée de Fourier de l'image tatouée et vous en extrayez, grâce à la clé, le signal caché (voir la figure 5). Reste alors à vérifier si celui-ci contient bien la structure adéquate.

LES M-SÉQUENCES

Un tatouage bien identifiable est obtenu à l'aide de suites binaires, appelées «M-séquences», qui présentent une très faible corrélation avec toutes leurs versions décalées ; à titre d'exemple (voir la figure 4), une version décalée à droite d'un cran de (1, -1, 1, -1, -1) est (-1, 1, -1, 1, -1).

L'analyse de la courbe de corrélation de ce pic permet de l'identifier même s'il a été déformé. La vérification est plus probante qu'une comparaison de la suite initiale de bits et de cette suite altérée. Cette technique a été employée, entre autres, par l'équipe «télé» de l'Université catholique de Louvain, qui a mis au point

5. LE TATOUAGE PAR ÉTALEMENT DE SPECTRE



a) Le signal à cacher est une grille-image constituée de carrés de pixels "noirs" ou "blancs", dont l'ordre est celui d'une m-séquence. b) On superpose à cette image le tatouage placé sur un "tôle ondulée" de fréquence et de direction données par une clef secrète. c) Ce tatouage est surimposé à l'image : en fait les pixels "noirs" (resp. "blancs") correspondent à une augmentation (resp. diminution) de la luminance de l'image. Lors de cette étape, la grille est modifiée afin de préserver l'invisibilité du tatouage, surtout dans les parties homogènes de

l'image. d) Pour vérifier la présence du tatouage, on extrait de la transformée de Fourier de l'image tatouée le signal caché, localisé autour de la fréquence et de la direction données par la clef secrète. On prend la transformée de Fourier inverse et l'on réobtient la grille de départ, ou plutôt une version altérée de celle-ci. Malgré la modification des pixels de cette dernière, on peut estimer grâce à une mesure de corrélation, si elle a bien été obtenue à partir d'une M-séquence, et donc si l'image a bien été tatouée avec la clef en question.

en 1996 un algorithme de tatouage incrustant un filigrane robuste. Utilisant une modélisation du système de vision humaine, les chercheurs déterminent l'invisibilité du filigrane et analysent à l'aide de filtres perceptifs, à quels endroits le filigrane peut être plus important (en général dans les zones de fortes variations de luminance). On obtient ainsi un tatouage qui résiste très bien à la suppression de quelques lignes sur le bord de l'image, à la compression JPEG, à l'addition de bruit blanc, à l'application d'un filtre passe-bas, ainsi qu'à une impression/renumérisation par scanner. Mais les changements d'échelle, symétries, rotations, découpages peuvent toutefois détruire le tatouage.

En 1997, J. J. K. O'Ruanidh et T. Pun, de l'Université de Genève, ont proposé une technique combinant l'étalement de spectre avec des considérations d'invariance par rotations, changements d'échelle et translations. Leur tatouage résiste ainsi à ces manipulations, à la compression JPEG ainsi qu'à l'extraction d'une grosse portion de l'image. Citons

aussi d'autres familles d'algorithmes de tatouage qui reposent sur des schémas de compression utilisant diverses techniques comme la transformation par ondelettes ou les techniques fractales. Les filigranes ainsi produits n'offrent pas de résistance particulière, excepté face aux techniques de compressions sur lesquelles ils reposent.

On sait donc camoufler des filigranes invisibles et assez robustes dans les images fixes. Néanmoins de nombreux problèmes restent posés : des découpages en petits morceaux de l'image, l'ex-

traction d'un détail de l'image (qui peut donner lieu à un montage), la suppression de lignes ou de colonnes au «milieu» de l'image détruisent les filigranes actuels. Dans l'ensemble les résultats restent expérimentaux et l'on ne dispose pour l'instant que d'un embryon de formalisation théorique du tatouage : quelle quantité d'information peut-on réellement cacher dans une image, pour un algorithme de tatouage donné ? Comment atteindre cette limite ? Les tatoueurs cherchent maintenant à chausser les bottes de géant du mathématicien Shannon.

Caroline FONTAINE est maître de conférences à l'Université de Lille 1. Son site web est : <http://www.lifl.fr/~fontaine/>

<http://www.rocq.inria.fr/codes/Watermarking/> (en français : définitions et présentation du tatouage).

<http://www.ima.enst.fr/~maitre/enst-ens.html> (en français : liste de points sur le tatouage).

<http://www.cl.cam.ac.uk/~fapp2/steganography/> (en anglais : ce site, traitant de la stéganographie et du tatouage, est très complet).

Identification and Protection of Multimedia Information, in *Proceedings of the IEEE*, numéro spécial, vol. 87, n° 7, juillet 1999. (en langue anglaise : un bon bilan de la recherche actuelle sur le thème du tatouage : textes, images, son).