

# Compression embarquée d'images satellites : Vers l'exploitation de la géométrie

X. Delaunay<sup>1</sup>

C. Thiebaut<sup>2</sup>

V. Charvillat<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TésA/CNES/NOVELTIS\*, 14-16 port St Etienne, 31000 Toulouse

<sup>2</sup> CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9

<sup>3</sup> IRIT/ENSEEIH, 2 rue Camichel, 31071 Toulouse cedex 7

xavier.delaunay@tesa.prd.fr, carole.thiebaut@cnes.fr, Vincent.Charvillat@enseeiht.fr

Concours Jeune Chercheur : Oui

## Résumé

*La résolution des images acquises à bord des satellites d'observation de la terre est de plus en plus grande et la compression à bord doit donc être de plus en plus performante pour transmettre les données au sol. L'augmentation des capacités de calcul et de mémoire permet la mise en place d'algorithmes de plus en plus complexes. Actuellement, on envisage des compresseurs capables de compenser les faiblesses de la transformée en ondelettes séparable, et qui utiliseraient une autre transformée et/ou des codeurs plus performants. Dans cette communication, nous mettons en évidence deux sortes de corrélations résiduelles entre coefficients d'ondelettes qu'il serait souhaitable d'éliminer pour améliorer la compression. Les premières corrélations sont situées dans un voisinage local. Les secondes sont liées aux structures géométriques de l'image et sont observées sur de plus grandes distances.*

## Mots clefs

Satellites, ondelettes, corrélations, structures, contours.

## 1 Introduction

Les applications issues de l'imagerie satellite sont de plus en plus diverses. Certaines nécessitent des images multi-, voire hyper-spectrales [1, 2, 3], d'autres deux prises de vue (stéréovision) [4, 5]. Ces nouveaux besoins contribuent fortement à l'augmentation du volume des données à transmettre au sol. Dans ces situations, des techniques de compression spécifiques ont été, et sont en cours de développement.

Dans le cas plus classique des images panchromatiques, l'évolution de la résolution des capteurs constitue aussi un facteur d'augmentation du volume des données. L'utilisation à bord de systèmes de compression de plus en plus efficaces est nécessaire pour transmettre les données collectées vers le sol.

La transformée en ondelettes a permis une nette amélioration des performances des compresseurs embarqués par

rapport à la DCT (Discrete Cosine Transform) [6]. Cependant, les performances des compresseurs à base de transformée en ondelettes ne suffiront pas pour les futures missions THR (Très Haute Résolution). Aussi, l'exploitation de la géométrie des images lors de la compression est envisagée.

La compression des images à bord des satellites d'observation de la terre pose des problèmes que l'on ne rencontre pas au sol. Les spécificités de la compression satellite embarquée seront présentées dans une première partie. Ensuite, nous montrerons que la transformée en ondelettes séparable ne décorrèle pas complètement les images en mettant en évidence des redondances résiduelles dans les images transformées. Nous étudierons, d'abord ces redondances dans un voisinage restreint, puis nous considérerons des régions plus étendues qui suivent les géométries locales des images.

## 2 La compression embarquée

### 2.1 Besoins et contraintes

Les satellites d'observation de la terre sont utilisés pour diverses applications : agriculture, urbanisme, cartographie. Les images acquises sont donc diverses et la qualité minimale requise est un PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) de 40dB. L'augmentation de la résolution des images entraîne une augmentation des débits en entrée des compresseurs. Ceci est illustré dans le Tableau 1 dans les cas de trois missions récentes d'observation de la terre : SPOT4, SPOT5 et PLEIADES. Les besoins en compression sont donc de plus en plus importants avant la transmission des données au sol.

	SPOT4 (1998)	SPOT5 (2002)	PLEIADES (2008)
Fauchée	60km	60km	20km
Résolution	10m	2,5m	0,7m
Débit	32Mb/s	128Mb/s	4,5Gb/s

Tableau 1 – Résolutions et débits des satellites d'observation de la terre en imagerie panchromatique

\*Ces travaux ont été menés grâce au soutien financier de NOVELTIS et du CNES.

Il existe trois contraintes majeures en compression embarquée. La première est liée au mode d'acquisition des images d'observation de la terre. Les capteurs balayant la surface de la planète produisent une image de largeur fixe mais de longueur virtuellement infinie. Cette image doit donc être compressée et transmise au fur et à mesure de son acquisition. La technique employée consiste à traiter l'image au fil de l'eau, c'est-à-dire, bloc de lignes par bloc de lignes. Sur PLEIADES, les blocs de lignes sont de 16 lignes.

La seconde contrainte lors de la compression à bord est liée à la capacité du canal de transmission des données vers le sol. Cette capacité est limitée et le débit des données transmises est fixe. En conséquence, le débit en sortie du compresseur doit lui aussi être fixe. Cependant, le taux de compression dépend des statistiques de l'image. Il peut être élevé sur des zones uniformes et plus faible ailleurs. C'est pourquoi, sur SPOT5, un algorithme de régulation de débit couplé à une mémoire tampon est utilisé [6]. L'utilisation de la transformée en ondelettes et d'un codeur par plan de bits produisant un train binaire emboîté permet aussi d'obtenir un débit constant. En effet, dans ce cas, la transmission est progressive et la régulation du débit est effectuée au bit près par simple troncature du train binaire emboîté. L'utilisation d'un tel codeur est recommandée par le CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) [7].

La troisième contrainte est liée aux circuits électroniques. En effet, pour assurer un traitement en temps réel, les algorithmes sont implantés matériellement. Les capacités de calcul dépendent donc du nombre de portes disponibles sur les circuits. C'est pourquoi, l'algorithme de compression doit être peu complexe. Néanmoins, avec l'évolution des technologies (figure 1), cette contrainte est relaxée. En 2004, le nombre de portes par centimètre carré de circuit était de 2 millions, ce qui permettait une complexité calculatoire de plus de 200 opérations par pixels.

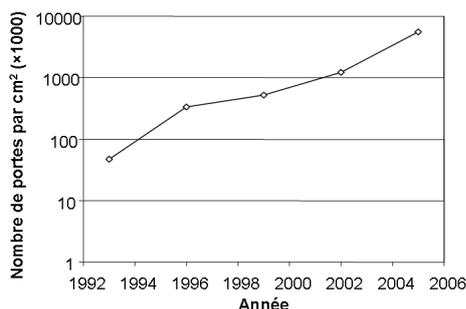


Figure 1 – Évolution du nombre de portes des circuits électroniques

## 2.2 Les méthodes actuelles

Sur SPOT5, lancé en mai 2002, le compresseur utilise une transformée en cosinus discrets (DCT) [6]. Grâce à un algorithme de régulation de débit, le taux de compression est maintenu constant et égal à 2,8.

Sur PLEIADES, qui sera lancé fin 2008, le compresseur utilise une transformée en ondelettes. Ceci permet d'augmenter le taux de compression à 6 pour une qualité d'image identique. De plus, les images décompressées ne présentent plus d'effet de bloc mais un léger flou. L'algorithme de transformée en ondelettes utilise le « lifting scheme » (schéma de lissage) [8] qui présente une complexité calculatoire plus faible que le schéma de convolution et qui ne nécessite pas de mémoire auxiliaire. Ce schéma « lifting » permet donc d'économiser deux ressources critiques à bord. Comme dans la recommandation du CCSDS [7], le codage est effectué par plan de bits. La régulation de débit est donc implicitement effectuée par troncature du train binaire emboîté généré par le codeur.

## 2.3 Avenir et enjeux



Figure 2 – Image d'un capteur aéroporté à la résolution 20 cm

Les diverses applications liées à l'observation de la terre, telles que la défense, la sécurité civile, et la prévention des catastrophes naturelles, demandent des résolutions toujours plus fines. De plus, dans les futures missions d'observation de la terre, des systèmes de détection à bord et de régions d'intérêt (ROI) pourraient être mis en place. La résolution des images sera supérieure à celle de PLEIADES (70 cm). La figure 2 illustre une image à grande résolution. Enfin, pour un PSNR de 50dB, le taux de compression devra être supérieur à 6. Les débits d'acquisition seront donc plus importants et l'utilisation de la transformée en ondelettes ne suffira plus pour compresser les données au débit imposé par le canal de transmission.

Pour remédier à ce problème, deux pistes sont envisagées : dans le paragraphe 3, on identifie des résidus de corrélations dans les images transformées en ondelettes qui pourraient être exploités par des codeurs contextuels afin de mieux compresser les images. Dans le paragraphe 4, l'exploitation de la géométrie des images est envisagée, soit en utilisant une autre transformée, soit en travaillant directement dans les images transformées en ondelettes.

### 3 Redondances résiduelles entre coefficients voisins dans la transformée en ondelettes

#### 3.1 Redondances résiduelles dans la transformée en ondelettes

Bien que la transformée en ondelettes soit utilisée pour décorrélérer les images, il est encore possible d'observer des structures dans les images transformées. La figure 3, représente la transformée en ondelettes de l'image de la figure 2 obtenue avec les filtres 9/7 CDF (Cohen-Daubechies-Feauveau [9]). Ce sont les filtres les plus utilisés en compression. Ils sont notamment présents dans le standard JPEG2000 [10] et la recommandation du CCSDS [7]. Sur la figure 3, l'échelle de représentation des coefficients d'ondelettes a été ajustée de sorte que toute la gamme de gris soit utilisée dans chaque sous-bande. Ceci permet de faire apparaître les structures de l'image.

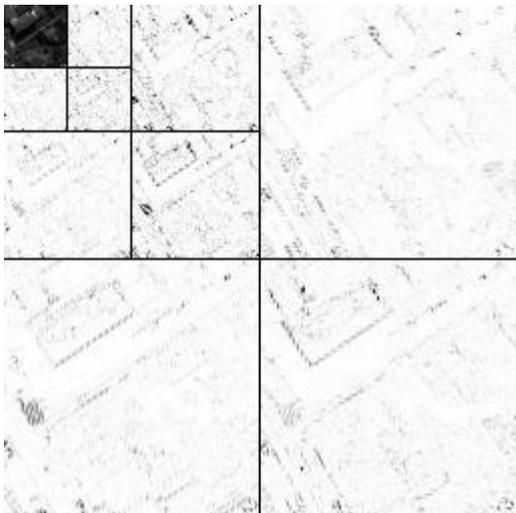


Figure 3 – Transformée en ondelettes de la figure 2

Des dépendances statistiques ont aussi été observées entre coefficients d'ondelettes dans un voisinage très local. Liu et Moulin [11] ont étudié les dépendances inter et intra échelles en mesurant l'information mutuelle entre deux ou plusieurs coefficients d'ondelettes. Simoncelli a modélisé les probabilités d'apparition conjointes entre coefficients d'ondelettes voisins [12], et avec Buccigrossi, développé un codeur basé sur cette modélisation [13].

#### 3.2 Identification quantitative de redondances entre coefficients d'ondelettes voisins

Dans ce paragraphe, on s'intéresse aussi aux dépendances statistiques entre coefficients d'ondelettes dans un voisinage très local mais, plutôt que d'étudier l'information mutuelle ou les probabilités d'apparitions conjointes, nous étudions les coefficients de corrélation entre coefficients

d'ondelettes non quantifiés. Une mesure d'information mutuelle sera aussi effectuée afin de valider les résultats obtenus. Pour un coefficient d'ondelettes  $C$  considéré, on définit un ensemble de sept voisins dans la transformée en ondelettes [13]. Ce voisinage est explicité à la figure 4.

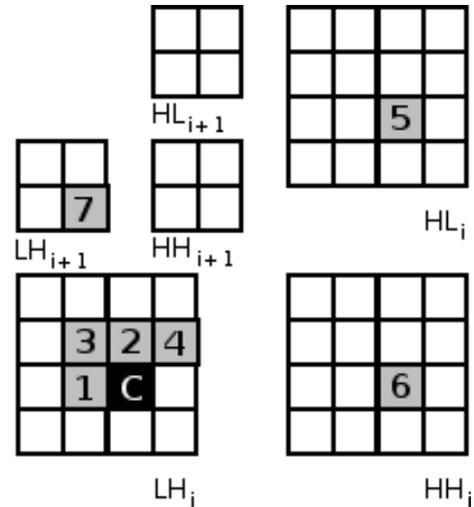


Figure 4 – Définition d'un voisinage dans le domaine ondelettes. Les voisins numérotés de 1 à 4 sont situés dans la même sous-bande que le coefficient  $C$ . Les voisins numérotés 5 et 6 sont les cousins du coefficient  $C$ , et le voisin numéroté 7 est son parent. Ce dernier n'est pas défini pour un coefficient dans une des sous-bandes à la résolution 3.

La figure 5 présente les coefficients de corrélation entre le coefficient  $C$  et chacun de ses sept voisins sur la transformée en ondelettes illustrée à la figure 3. Ces coefficients de corrélation ont été obtenus en considérant successivement l'ensemble des coefficients de chaque sous-bande comme les réalisations d'une variable aléatoire. On a donc fait abusivement l'hypothèse d'ergodicité et de stationnarité des coefficients d'ondelettes [12]. Néanmoins, on constate qu'il existe des coefficients de corrélation de plus de 0,4 en valeur absolue entre coefficients voisins de la même sous-bande (voisins numérotés 1 à 4). Les coefficients de corrélation inter sous-bandes et inter échelles sont eux toujours inférieurs à 0,1 en valeur absolue. De plus, la corrélation entre les coefficients d'ondelettes diminue lorsque l'échelle de la transformée augmente. Enfin, le signe des coefficients de corrélation est à mettre en relation avec les filtres d'ondelettes appliqués à l'image.

Ces corrélations résiduelles dans la transformée en ondelettes ont été observées sur d'autres images satellites avec les mêmes ordres de grandeurs mais avec des variations selon la géométrie prédominante. Par contre, sur les transformées en ondelettes d'images de bruit gaussien et impulsionnel, les coefficients de corrélation observés sont inférieurs à 0,01 en valeur absolue, ce qui suggère que ces corrélations entre coefficients d'ondelettes voisins sont liées à la structure des images. Sur des images synthétiques contenant des contours mais sans textures, on observe le même

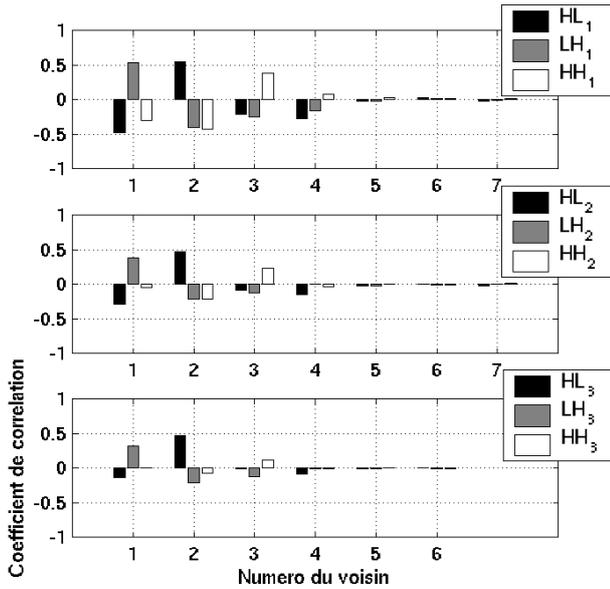


Figure 5 – Coefficients de corrélation entre coefficients d'ondelettes voisins dans les diverses sous-bandes

type de corrélation que sur les images naturelles mais dans ce cas, les corrélations augmentent avec l'échelle de la transformée. Sur des images de textures sans aucun contour telles que des images satellites de mer ou de champ, on a pu observer, dans les sous-bandes à la résolution 1, des coefficients de corrélation atteignant 0,5 pour les voisins numérotés 1 et 2. Cependant, dans ce cas, les corrélations diminuent très rapidement avec l'échelle de la transformée. Elles sont toutes inférieures à 0,2 à la résolution 2. On peut donc faire l'hypothèse que ces corrélations sont issues des très petites structures qui constituent la texture et qui n'existent qu'à haute résolution. Seules les corrélations issues des grandes structures (les contours) peuvent être observées à faible résolution.

La figure 6 présente l'information mutuelle relative [14] entre coefficients d'ondelettes voisins. On préfère utiliser une mesure relative plutôt qu'une simple mesure d'information mutuelle pour pouvoir comparer des sous-bandes qui n'ont pas les mêmes entropies. L'information mutuelle relative  $I_r(C, N)$  peut être interprétée comme la proportion d'information qu'il est possible d'économiser pour le codage de la variable aléatoire  $C$  si on connaît parfaitement la variable aléatoire  $N$ . Elle s'exprime en fonction des entropies d'ordre 0 de la manière suivante :

$$I_r(C, N) = \frac{2(H_0(C) - H_0(C|N))}{H_0(C) + H_0(N)}$$

La figure 6 confirme qu'il est possible d'exploiter les relations entre coefficients d'ondelettes dans un voisinage très local. En effet, dans les sous-bandes à la résolution la plus fine, l'information mutuelle relative approche les 20% pour les voisins 1 et 2. Néanmoins, elle est inférieure à 10% dans

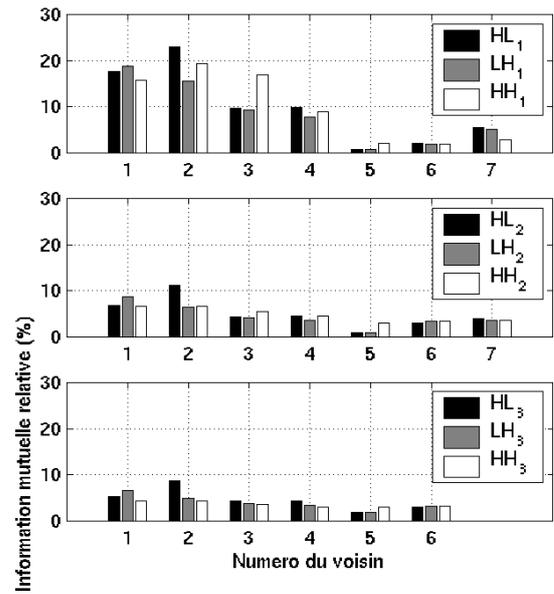


Figure 6 – Information mutuelle relative entre coefficients d'ondelettes voisins dans les diverses sous-bandes

les autres échelles et autour de 5% pour les voisinages inter sous-bandes (voisins 5, 6 et 7).

La plupart des dépendances statistiques sont donc observées à l'intérieur des sous-bandes. Afin de savoir si des corrélations existent à plus grande distance, la même étude a été effectuée sur un voisinage plus étendu à l'intérieur de chaque sous-bande. On a constaté qu'à toutes les échelles, et dans toutes les sous-bandes, les corrélations entre coefficients d'ondelettes diminuent avec la distance qui les sépare. A une distance de 3 pixels, toutes les corrélations sont inférieures à 0,1.

Cette étude statistique montre que des dépendances très locales liées à la structure des images sont observables à l'intérieur d'une même sous-bande. Ces dépendances existent sur la totalité des coefficients de chaque sous-bande de la transformée en ondelettes. Les coefficients de corrélation entre coefficients voisins spatialement sont de l'ordre de 0,2. Cependant, dès que la taille du voisinage augmente, les corrélations observées deviennent très faibles. Pourtant, des grandes structures sont observées dans les images transformées (figure 3). Elles proviennent de l'inefficacité de la transformée en ondelettes 2D séparable à représenter correctement les contours. En effet, cette transformée n'est capable d'exploiter les régularités géométriques que dans les directions des deux axes alors que des contours interviennent avec toutes les orientations. Ces régularités géométriques résiduelles doivent donc être éliminées afin d'améliorer la compression. Les transformées géométriques présentées dans le paragraphe suivant peuvent être une piste d'amélioration.

## 4 Redondances résiduelles liées à la géométrie

### 4.1 Les transformées géométriques

De nouvelles transformées, dérivées des ondelettes, ont récemment été développées dans le but d'améliorer la description des contours et des structures géométriques des images. Do et Vetterli [15] ont formulé une liste de cinq caractéristiques que devrait posséder une nouvelle transformée géométrique. Ces caractéristiques sont la multirésolution, la localisation spatiale et fréquentielle des éléments de base, l'absence de redondance, la multi-directionnalité, et l'anisotropie des éléments de base. La transformée en ondelettes 2D séparable possède les trois premières caractéristiques. Les deux dernières permettent une représentation efficace des structures géométriques. Les contourlets [15] et les curvelets [16] sont deux exemples de transformées géométriques qui sont proches conceptuellement. Elles constituent des familles de «frames» d'ondelettes géométriques conçues pour représenter les contours de façon parcimonieuse. Le problème majeur pour utiliser ces transformées en compression est qu'elles sont redondantes. La seconde génération de bandelettes développée par Peyré [17] ne suit pas le même raisonnement. La transformée en bandelettes est construite au-dessus d'une transformée en ondelettes 2D séparable et garde ainsi les trois bonnes caractéristiques de cette dernière. L'information résiduelle dans des blocs de  $4 \times 4$  coefficients d'ondelettes est ensuite compactée en utilisant des bases de polynômes directionnelles adaptées à la géométrie. Cette transformée permet d'atteindre des taux de compression plus élevés (en terme de débit/PSNR) que la transformée en ondelettes seule. La comparaison des performances d'un compresseur basé sur les bandelettes avec l'algorithme de compression proposé par le CCSDS [7] est en cours. Le compresseur en bandelettes présente un avantage non négligeable en compression satellite : l'erreur maximale commise à la reconstruction est toujours très faible. Sur l'image de la figure 2 dont la dynamique est 4096, à 1 bpp l'erreur maximale n'est que de 164 lorsque les bandelettes sont utilisées. Elle est de 245 avec l'algorithme du CCSDS. En effet, les bandelettes permettent de mieux décrire les contours et les effets de flou introduits par les ondelettes sont diminués. Cependant, dans l'état, les bandelettes ne diminuent pas l'entropie d'ordre 0 et certaines corrélations ont été observées entre les coefficients de bandelettes. Un codeur contextuel est donc nécessaire pour atteindre des taux de compression élevés.

### 4.2 Identification quantitative de redondances géométriques

Les bandelettes sont appliquées successivement sur des blocs de coefficients d'ondelettes de petite taille et ne peuvent donc pas exploiter l'ensemble des grandes structures visibles sur la figure 3. Dans ce paragraphe, nous allons mettre en évidence les corrélations qui peuvent exister

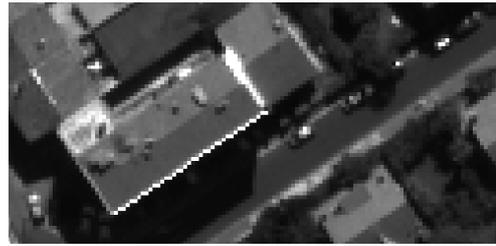


Figure 7 – Détection d'un contour (en blanc)

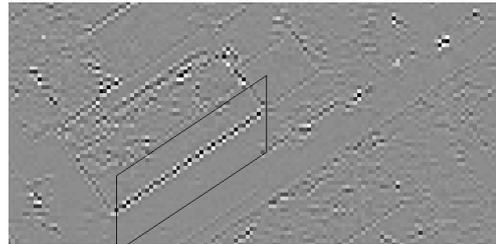


Figure 8 – Sous-bande  $HL_1$  de la transformée en ondelettes de la figure 7 et zone du contour étudié

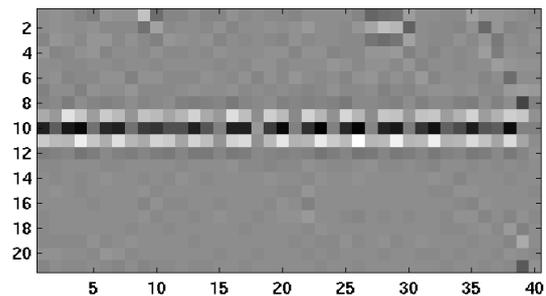


Figure 9 – Lecture colonne par colonne de la zone du contour étudié, les dépendances géométriques sont mises en évidence

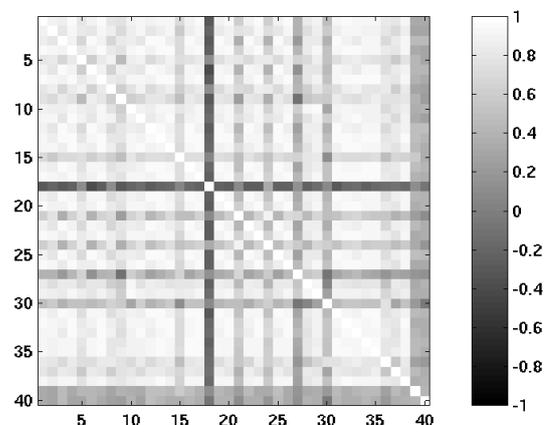


Figure 10 – Matrice des coefficients de corrélation entre les colonnes de coefficients d'ondelettes de la zone étudiée

le long de l'une de ces structures.

Sur la figure 7, un contour a été détecté en utilisant un filtrage de Sobel vertical. Les coefficients d'ondelettes de la figure 8 ont été réordonnés le long de ce contour et sont présentés à la figure 9. En considérant chaque colonne de cette figure comme une variable aléatoire et chaque ligne comme une réalisation, on peut tracer la matrice des coefficients de corrélation de toutes ces variables aléatoires 2 à 2 (figure 10). On constate des corrélations supérieures à 0,7 même à longue distance, par exemple entre la colonne 1 et la colonne 38.

Comme la résolution des capteurs embarqués à bord des satellites augmente, les structures observées sont de plus en plus longues. Les grandes régularités sont donc de plus en plus fréquentes et leur exploitation suscite beaucoup d'intérêt. L'objectif pour des codeurs en ondelettes orientés vers l'exploitation de la géométrie serait donc de pouvoir tenir compte des structures de l'image afin de décorréler plus efficacement l'information.

## 5 Conclusions et perspectives

Nous avons montré que la transformée en ondelettes ne décorrèle pas totalement le contenu des images. Dans cette communication, deux types de corrélations résiduelles ont été mis en évidence : les corrélations entre coefficients voisins spatialement, et les corrélations le long des structures de l'image. Pour augmenter les taux de compression, des codeurs tels que EBCOT [18] exploitent déjà, en partie, les corrélations entre coefficients voisins. Les futurs compresseurs embarqués devront aussi savoir exploiter les grandes régularités géométriques qui existent dans les zones urbaines ou agricoles pour atteindre des débits inférieurs à ceux des compresseurs actuels. L'exploitation de la géométrie peut être menée sur deux fronts : en utilisant de nouvelles transformées dérivées des ondelettes et/ou des codeurs s'adaptant aux dépendances statistiques et aux régularités géométriques. L'augmentation de la longueur des structures avec la résolution et les premières études réalisées montrent que ce sont des pistes tangibles. De plus, cette voie pourrait s'ouvrir sur la détection à bord de zones d'intérêt et sur l'analyse sémantique des images satellites.

## Références

- [1] X. Tang, W. A. Pearlman, et J. W. Modestino. Hyperspectral image compression using three-dimensional wavelet coding. *SPIE Image and Video Communications and Processing*, 5022 :1037–1047, Janvier 2003.
- [2] E. Christophe, D. Léger, et C. Mailhes. Quality criteria benchmark for hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(9) :2103–2114, Septembre 2005.
- [3] C. Thiebaut, D. Lebedeff, C. Latry, et Y. Bobichon. On-board compression algorithm for satellite multispectral images. Dans *Data Compression Conference (DCC'06)*, page 467, Snowbird, Mars 2006.
- [4] William L. Barnes, éditeur. *SPOT5 THR mode*, San Diego, Octobre 1998. Earth Observing Systems III, SPIE.
- [5] A. Baudoin, M. Schroeder, C. Valorge, M. Bernard, et V. Rudowski. The HRS-SAP initiative : A scientific assessment of the high resolution stereoscopic instrument on board of SPOT 5 by ISPRS investigators. *IAPRS*, 35(B1) :372–378, Juillet 2004.
- [6] William L. Barnes, éditeur. *Selection of the SPOT-5 Image Compression algorithm*, volume 3439-70, San Diego, Octobre 1998. Earth Observing Systems III, SPIE.
- [7] CCSDS. Image data compression. recommended standard. *CCSDS 122.0-B-1, Blue Book*, Novembre 2005.
- [8] W. Sweldens. The lifting scheme : a construction of second generation wavelets. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 29(2) :511–546, Mars 1998.
- [9] A. Cohen, I. Daubechies, et J. Feauveau. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 45 :485–560, 1992.
- [10] JPEG committee. JPEG 2000 Part I Final committee draft version 1.0. (ISO/IEC FCD15444-1 : 2000), Mars 2000.
- [11] J. Liu et P. Moulin. Information-theoretic analysis of interscale and intrascale dependencies between image wavelet coefficients. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10(11) :1647 – 1658, Novembre 2001.
- [12] E.P. Simoncelli. Modeling the joint statistics of images in the wavelet domain. Dans *Proc SPIE, 44th Annual Meeting*, volume 3813, pages 188–195, Denver, CO, Juillet 1999.
- [13] R.W. Buccigrossi et E.P. Simoncelli. Image compression via joint statistical characterization in the wavelet domain. *IEEE Transactions on Image Processing*, 8(12) :1688–1701, Décembre 1999.
- [14] J. Malo, I. Epifanio, R. Navarro, et E.P. Simoncelli. Non-linear image representation for efficient perceptual coding. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(1) :68–80, Janvier 2006.
- [15] M.N. Do et M. Vetterli. The contourlet transform : an efficient directional multiresolution image representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14(12) :2091–2106, Décembre 2005.
- [16] E. Candès, L. Demanet, D. Donoho, et L. Ying. Fast discrete curvelet transforms. *Tech. Report, California Institute of Technology*, 2005.
- [17] G. Peyré. *Géométrie multi-échelles pour les images et les textures*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, Décembre 2005.
- [18] D. Taubman. High performance scalable image compression with EBCOT. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9(7) :1158–1170, Juillet 2000.