

Utilisation conjointe de l'espace des couleurs et de la transformation en ondelettes pour la fusion d'images HRV de SPOT et RSO de RADARSAT

YOUCEF CHIBANI^a, AMRANE HOUACINE^a et ANDRÉ OZER^b

^a *Laboratoire de traitement du signal, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumédiène (USTHB), B.P. 32, El-Alia, Alger 16111, Algérie. Téléphone : (213) 2247912, poste 802 ; télécopieur : (213) 2247187 ; courriel : ychibani@mailcity.com*

^b *Laboratoire de géomorphologie et télédétection, Institut de géographie de l'Université de Liège, allée du 6 Août, n°: 2, Bât. BI 1, 4000 Liège, Belgique. Téléphone : 32-4-3665446 ; télécopieur : 32-4-3665722 ; courriel : aozer@ulg.ac.be*

(soumis le 13 décembre 1999 ; révisé le 20 janvier 2000 ; accepté le 4 octobre 2000)

Nous proposons dans cet article une méthode de fusion des images multispectrales et radar par l'utilisation conjointe de l'espace des couleurs et de la transformation en ondelettes. La transformation de l'espace des couleurs permet une séparation des informations spatiale (composante luminance) et spectrale (composantes teinte et saturation). La substitution de la composante luminance par une combinaison luminance-radar permet de produire des images fusionnées multispectrale-radar. Celle-ci est produite au moyen d'un processus de fusion appliqué dans le plan des ondelettes pour exploiter les informations contenues dans les images luminance et radar. Pour cela, nous développons un modèle de fusion dépendant des coefficients d'ondelettes et d'un paramètre de fusion qui permet de régler le poids relatif des informations luminance et radar dans le processus de fusion. Un tel paramètre dépend de l'énergie des coefficients qui constitue un bon indicateur de l'importance des coefficients luminance ou radar. Pour montrer l'intérêt et l'impact de cette méthode, nous l'évaluons, de façon qualitative et quantitative, sur des images HRV de SPOT et RSO de RADARSAT couvrant une région du Viêt-nam (Haïphong). L'évaluation qualitative révèle que l'information radar est injectée dans les images multispectrales lorsque celle-ci est suffisamment dominante. Cela est mis en évidence par l'examen du paramètre de fusion. Par contre, l'évaluation quantitative, par l'utilisation du coefficient de corrélation et l'écart spectral, montre que les propriétés spectrales sont mieux préservées comparativement à la méthode conventionnelle de substitution de la composante luminance par l'image radar.

Mots-clés : fusion d'images ; espace des couleurs ; transformation en ondelettes ; images multispectrales ; image radar.

Joint use of color space and wavelet transform for SPOT and RADARSAT image fusion

Usually, two methods are used for fusing optical and radar images. The first method uses the colour space as the intensity-hue-saturation (IHS) representation for fusing the multispectral and radar (R) images. It consists in substituting the spatial component (I) by the radar image. Multispectral-radar images are then produced by applying the inverse IHS transform. The second method exploits the wavelet transform (WT) for fusing panchromatic and radar images by means of a criteria defined in the wavelet domain. The originality of this work lies in the joint use of the IHS and the wavelet transform for fusing multispectral and radar images. The development of this method is motivated by the fact that the direct substitution of the I component by the radar image corresponds to rejecting all information coming from the I component. While, this component contains also important information's that should be preserved in the composite image. For this, we propose a more appropriate procedure which consists in producing a composite I-R component through a combination of the I and R images in order to substitute it to the I component. To ensure that all significant features are selected into I-R component, we develop a model, in the wavelet domain, which allows an adaptive selection of dominant features. This model is a function of I and R wavelet coefficients and a fusion parameter which indicates the relative importance of two components. Such a parameter ranges from zero to one and depends of wavelet coefficient energy. When this parameter tends to zero, the k wavelet coefficient is retained in the I-R compartment. Otherwise, when the parameter tends to one, the I wavelet coefficient is retained. For values of the parameter between these two extreme values, both I and R wavelet coefficients contribute in the I-R compartment.

In order to evaluate the interest and the impact of this method, we test it on HRV (XS1, XS2, XS3) images of SPOT and RSO image of RADARSAT covering a region of Viêt-nam (Haïphong Bay). The qualitative evaluation indicates that the radar information is introduced into multispectral images when the details are sufficiently dominant. This is pointed out by examining the values of the fusion parameter through scales which are represented as images. These constitute a good indicator to point out the relative importance of the I and R information for each region of the images. They may thus be helpful for better interpretation. In order to evaluate, in terms of spectral content, the resemblance of multispectral and fused multispectral-radar images, we use two measures based on correlation coefficient and index deviation. These two measures reveal a better preservation of the spectral properties by our method.

Keywords : image fusion ; space colour ; wavelet transform ; multispectral images, radar image.

1. INTRODUCTION

La disponibilité d'images de la Terre, provenant de nombreux capteurs optiques (visible et infrarouge) et radar, permet d'étendre nos connaissances du milieu et de mieux appréhender nos décisions sur le paysage terrestre étudié. En effet, la complémentarité des sources d'informations offre une meilleure interprétation de la zone d'étude considérée. Ainsi, les capteurs optiques sont sensibles à la signature spectrale des objets et fournissent des images qui renseignent sur la végétation et l'occupation du sol (Sabins, 1987); tandis que le capteur radar est sensible à la géométrie des cibles et fournit une image qui renseigne sur la topographie, la rugosité et le contenu en humidité du sol (Elachi, 1988). Cette complémentarité d'informations a conduit la communauté scientifique au développement de méthodes de fusion permettant d'injecter l'information radar dans les images HRV de SPOT (Pohl and van Genderen, 1998). Nous pouvons distinguer pour cela deux principales approches. La première consiste à fusionner des images multispectrales (XS1, XS2, XS3) avec l'image radar et repose sur l'utilisation de l'espace des couleurs (De Sève *et al.*, 1996, Haack and Slonecker, 1994, Harris and Murray, 1990, Rast *et al.*, 1991; Yésou *et al.*, 1993, Welch and Ehlers, 1988). Par contre, la deuxième approche concerne la fusion des images panchromatiques (P) et radar (R), et repose sur l'utilisation du filtre passe-haut (Pohl and van Genderen, 1998) ou la transformation en ondelettes (Mangolini *et al.*, 1993; Mangolini, 1994).

Nous proposons dans cet article une méthode qui exploite conjointement l'espace des couleurs et la transformation en ondelettes pour fusionner des images multispectrales et radar. L'utilisation de l'espace des couleurs revient à affecter les images multispectrales aux trois composantes rouge-vert-bleu (RVB) pour les transformer en trois autres composantes indépendantes luminance-teinte-saturation (LTS) ou *Intensity Hue Saturation (IHS)* en anglais. Généralement, l'image *R* est substituée à la composante *L* pour produire des images fusionnées multispectrale-radar par l'application d'une transformation LTS inverse. Cependant, cette substitution directe ne se justifie pas dans le sens où la composante *L* recèle également des informations qui seraient utiles en complémentarité avec celles contenues dans l'image radar. Une démarche plus rigoureuse consisterait à chercher plutôt à combiner ces images au moyen d'un processus de fusion. La substitution totale apparaît alors seulement comme une alternative extrême qui ne s'imposerait que dans le cas particulier où la composante *L* serait vraiment de mauvaise qualité au sens du critère utilisé dans le

processus de fusion. Pour assurer une combinaison efficace des composantes images *L* et *R*, nous développons un modèle de fusion dans le plan des ondelettes. Celui-ci repose sur une sélection adaptative des coefficients d'ondelettes les plus significatifs ou dominants pour produire l'image composite LR. Celle-ci sera alors substituée à la composante *L* afin de produire les images fusionnées multispectrale-radar.

2. FUSION DES IMAGES MULTISPECTRALES ET RADAR

La fusion des images multispectrales et radar par l'utilisation de l'espace des couleurs repose sur la transformation des trois composantes rouge-vert-bleu (RVB) en trois autres composantes indépendantes luminance-teinte-saturation (LTS). Son avantage provient de sa capacité à séparer l'information spatiale, présente dans la composante *L*, de l'information spectrale, présente dans les composantes *T* et *S*.

Le processus conventionnel d'intégration de l'information radar dans les images multispectrales se déroule en quatre étapes (Harris and Murray, 1990) :

- affectation des images multispectrales de HRV aux trois composantes RVB; comme le capteur HRV ne fournit pas les images dans les bandes RVB, nous pouvons affecter les images multispectrales par translation des spectres de la façon suivante $R = XS3$, $V = XS2$ et $B = XS1$;
- transformation des composantes RVB en composantes LTS (Shih, 1995);
- substitution de la composante *L* par la composante radar *R*; elle se justifie par le fait qu'on veut intégrer l'information de l'image radar, caractérisée par une meilleure résolution spatiale, et garder l'information spectrale présente dans les composantes *T* et *S*;
- retour vers l'espace RVB par une transformation LTS inverse.

La substitution directe de la composante *L* par l'image *R* signifie que l'on rejette toutes les informations contenues dans *L*. Or, cette composante contient aussi des informations qui peuvent s'avérer utiles. Une procédure plus appropriée consisterait à extraire des détails des deux composantes images *L* et *R*, puis sélectionner uniquement ceux qui sont les plus significatifs ou dominants. L'image composite LR, qui sera substituée à la composante *L*, contiendrait alors les détails provenant de la combinaison des composantes *L* et *R*. Pour cela, nous proposons une solution qui consiste à mixer les informations provenant des deux images *L* et *R* dans le plan des ondelettes au moyen d'un modèle de fusion. Nous désignons cette méthode par l'abréviation OLTS

(ondelette LTS; en anglais WIHS pour wavelet intensity-hue-saturation). Nous discuterons donc brièvement de l'algorithme utilisé pour la décomposition en ondelettes de l'image, puis nous décrirons la procédure globale pour produire les images fusionnées multispectrale-radar.

2.1. Transformation en ondelettes

La transformation en ondelettes est un outil mathématique désormais classique pour l'analyse de l'image. Elle fournit des coefficients dits d'ondelettes qui permettent de décrire les variations locales autour d'un pixel à différentes échelles (Mallat, 1989). Lorsque ces variations sont importantes, les coefficients d'ondelettes acquièrent de fortes amplitudes et renseignent donc sur la pertinence de l'information. Cette propriété confère à la transformation en ondelettes le caractère de porteuse d'information grâce à la détection de primitives significatives au travers des échelles.

Le calcul rapide de la transformation en ondelettes discrète a conduit au développement de nombreux algorithmes (Mallat, 1989, Holschneider *et al.*, 1989, Shensa, 1992). Pour notre part, nous avons retenu l'algorithme « à trous » (Holdscheider *et al.*, 1989) pour les deux avantages suivants (Bijaoui *et al.*, 1994; Djamdji *et al.*, 1993): d'une part, c'est un algorithme isotrope qui permet de fournir un seul plan d'ondelettes à chaque échelle et, d'autre part, les différents plans d'ondelettes ont les mêmes dimensions que l'image originale, générant ainsi une redondance des détails lorsque ceux-ci sont dominants. Cette particularité fait qu'un détail significatif ou dominant apparaissant à une échelle donnée apparaît également à l'échelle suivante. Dans le cas contraire, il sera considéré comme non significatif. Cette propriété est exploitée pour fusionner les images multispectrales et radar.

2.2. Principe de fusion dans le plan des ondelettes

La fusion dans le plan des ondelettes consiste tout d'abord en une décomposition en ondelettes des images L et R . Chaque image sera alors représentée par son dernier plan d'approximation et un ensemble de plans de coefficients d'ondelettes correspondants aux détails de l'image aux différentes échelles. La construction de l'image fusionnée revient, d'une part, à produire un plan de la dernière approximation et, d'autre part, à synthétiser ses coefficients d'ondelettes par l'utilisation d'un modèle de fusion. L'image fusionnée luminance-radar LR est alors produite par l'application de la transformation en ondelettes inverse.

Représentons donc les images L et R par les ensembles respectifs des plans de décomposition, tels que :

$$E_L = \{w_1(L), \dots, w_i(L), \dots, W_N(L), a_N(L)\} \quad (1.a)$$

$$E_R = \{w_1(R), \dots, w_i(R), \dots, W_N(R), a_N(R)\} \quad (1.b)$$

où $w_i(L)$ et $w_i(R)$ sont les coefficients d'ondelettes produits à l'échelle i des images L et R respectivement, tandis que $a_N(L)$ et $a_N(R)$ sont les derniers plans d'approximation respectifs.

L'image composite LR luminance-radar sera produite en constituant l'ensemble suivant :

$$E_{LR} = \{w_1(LR), \dots, w_i(LR), \dots, W_N(LR), a_N(LR)\} \quad (2)$$

où $w_i(LR)$ et $a_N(LR)$ sont respectivement les coefficients d'ondelettes et le dernier plan d'approximation associés à l'image fusionnée.

2.3. Modèle de fusion

Pour synthétiser le coefficient $w_i(LR)$ à chaque position (k, l) et à l'échelle i , nous sommes amenés à définir un modèle de fusion permettant de combiner les coefficients d'ondelettes des images L et R . Un tel modèle se présenterait sous la forme suivante :

$$w_i(LR) = \alpha_i(k,l) w_i(L)(k,l) + [1 - \alpha_i(k,l)] w_i(R)(k,l) \quad (3)$$

où $\alpha_i(k,l)$ est le paramètre de fusion qui permet de pondérer l'importance relative des coefficients $w_i(L)$ et $w_i(R)$ dans le processus de fusion. Celui-ci doit être estimé localement à chaque échelle et admet ses valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$.

Un critère déjà adopté pour fusionner des images multispectrales et panchromatiques est fondé sur la sélection des éléments corrélés sur les deux images à fusionner afin de limiter la contamination spectrale (Cliche *et al.*, 1985; Mangolini *et al.*, 1993). Cette approche se justifie par le fait que les images multispectrales et panchromatiques contiennent des informations de nature similaire. Par contre, une telle démarche ne peut s'appliquer dans le cas de la fusion des images multispectrales et radar du fait que ces images sont de caractéristiques assez différentes. Dans notre méthode, nous cherchons plutôt à exploiter la complémentarité de ces images qui permettrait de sélectionner les informations les plus pertinentes au sens d'un critère. Celui-ci consiste à accorder une pondération plus forte aux éléments présentant un caractère dominant porteur d'une information importante. Ce critère permet ainsi de sélectionner uniquement les structures les plus significatives contenues dans les deux images L et R .

Afin de bien mettre en évidence la relation entre le paramètre de fusion et les caractéristiques des images à fusionner, examinons trois zones particulières de l'image. Ainsi, lorsqu'une zone est homogène dans l'image L et renferme des fluctuations plus prononcées dans l'image R , la décomposition en ondelettes de l'image R produit des coefficients d'amplitudes plus élevées comparativement aux coefficients de la composante L ($\alpha_i \approx 0$). Il en résulte

que le coefficient de l'image R est injecté intégralement dans l'image L. En revanche, lorsque cette zone renferme une transition dans l'image L, sa décomposition en ondelettes produit des coefficients de hautes amplitudes comparativement aux coefficients de l'image R. Dans ce cas, le modèle de fusion sélectionnera le coefficient d'ondelette de l'image L ($\alpha_i \approx 1$).

Un cas intermédiaire se manifeste lorsque la zone considérée renferme des fluctuations au sein des deux images L et R, dans ce cas, le modèle de fusion produira le coefficient de l'image LR par une combinaison des coefficients des deux images, la pondération étant réglée, à chaque échelle, par le paramètre de fusion dont la valeur sera intermédiaire entre zéro et un. Notons que l'approche par la substitution directe correspond à prendre systématiquement $\alpha_i \approx 0$ à toutes les échelles.

L'énergie des coefficients d'ondelettes est une mesure qui reflète assez bien le caractère dominant de l'information des images à fusionner. Son utilisation nous permet de définir le paramètre de fusion par l'expression suivante :

$$\alpha_i(k, l) = \frac{E_i(L)(k, l)}{E_i(L)(k, l) + E_i(R)(k, l)} \quad (4)$$

où $E_i(L)(k, l)$ et $E_i(R)(k, l)$ sont respectivement les énergies des coefficients d'ondelettes des images L et R calculées sur une fenêtre $M \times M$. Cette énergie s'exprime par :

$$E_i(\bullet)(k, l) = \frac{1}{M \times M} \sum_{i=k-M/2}^{k+M/2} \sum_{j=l-M/2}^{l+M/2} |w_i(\bullet)(i, j)|^2 \quad (5)$$

où (\bullet) représente l'une des composantes images L ou R.

Cette énergie locale constitue ainsi un bon indicateur pour mesurer l'importance du coefficient à retenir dans l'image fusionnée. En effet, lorsqu'un coefficient est significatif (ou dominant), son énergie est relativement élevée. Cette propriété permet une sélection adaptative des coefficients d'ondelettes issus des images L et R.

3. EXPÉRIMENTATIONS

Afin de montrer l'intérêt de notre méthode OLTS par rapport à la méthode classique LTS, nous proposons d'évaluer, de façon qualitative et quantitative, le résultat de ces deux méthodes sur les images fusionnées. L'évaluation qualitative permet de juger visuellement de la qualité des images fusionnées et les conséquences induites par l'introduction de l'information radar dans les images multispectrales. En revanche, l'évaluation

quantitative permet de mesurer l'impact des deux méthodes sur la préservation des propriétés spectrales des images.

3.1. Site test et données utilisées

Le site test retenu est situé au Viêt-nam et plus précisément dans la région de Haïphong (figure 1).

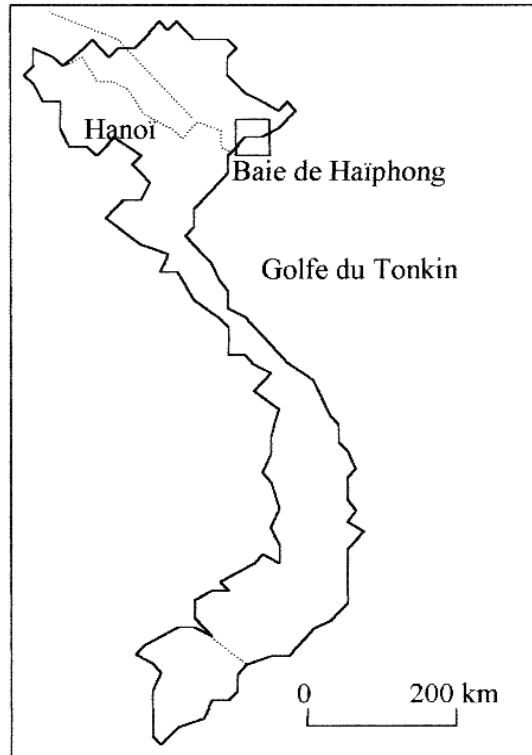


FIGURE 1 Carte de localisation du site test situé au Viêt-nam (baie de Haïphong). Location map of the test site located in Viêt-nam (Haiphong Bay)

TABLEAU 1. Caractéristiques des images HRV (XS) de SPOT et RSO de RADARSAT. Characteristics of HRV (XS) of SPOT and RSO of RADARSAT images.

	HRV (XS)	RSO
Date d'acquisition	24-12-1992	18-12-1996
Canaux	XSI (Vert), XS2 (Rouge),	Bande C
	XS3 (Infrarouge)	polarisation HH
Format image	1 A	PRI
Taille du pixel	20 m	12,5 m
Résolution spatiale	20 m	25 m

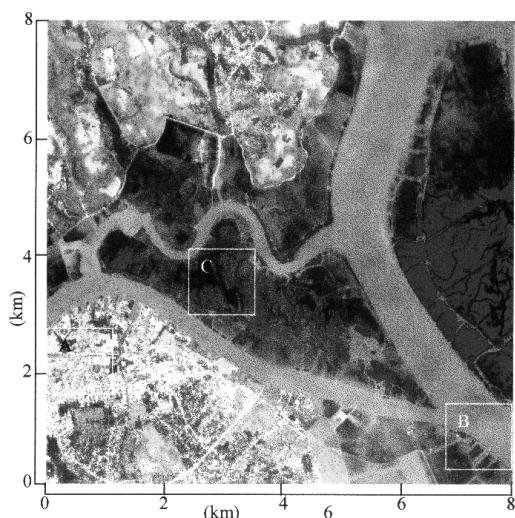


FIGURE 2 Composition colorée sur les images XS. *Color composition on XS images.* (voir image couleur XV à la fin de la revue)

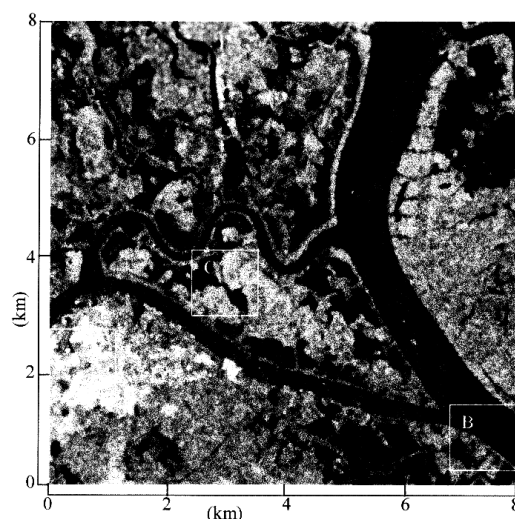


FIGURE 3 Image RSO RADARSAT. *RSO image of RADARSAT)*

Ce site ne présente pas de relief. Les images couvrent une région de 8 km par 8 km et sont acquises par les capteurs HRV (XS) de SPOT et RSO de RADARSAT. Ces images consistent en un triplet d'images multispectrales (XS) du 31 août 1992 (figure 2), représentées en une composition colorée par codage RVB (XS1 = bleu, XS2 = vert, XS3 = rouge), et d'une image radar RSO du 15 décembre 1996 (figure 3). Les caractéristiques de ces images sont reportées dans le tableau 1. L'image colorée XS révèle l'existence de plusieurs ruisselets et une végétation éparse, tandis que l'image radar fait ressortir la rugosité du sol et des habitations près de la rivière

apparaissant sous forme de points blancs très brillants (ville de Haiphong).

3.2. Prétraitements des images

Généralement, les images de télédétection qu'on cherche à fusionner ne sont pas acquises dans les mêmes conditions et nécessitent deux traitements classiques. Le premier traitement, particulier à l'image radar, consiste en une réduction du chatoiement (lié au caractère cohérent du signal radar) par l'application d'un filtre médian sur une fenêtre de 3 x 3 qui permet de préserver au mieux les transitions (Recs and Satchell, 1997). Le second traitement concerne la superposition géométrique des images multispectrales et radar afin de les représenter dans un même référentiel. Dans notre cas, cette superposition est réalisée en prenant comme référence HRV (XS) alors que l'image RSO est considérée comme étant l'image à rectifier. Pour caractériser les différences géométriques, une modélisation polynomiale par points d'appui est suffisante. L'extraction d'un certain nombre de points d'appui permet de calculer les coefficients du polynôme à l'ordre 2 en fonction des lignes et des colonnes. Les erreurs quadratiques moyennes, exprimées en pixels, sont respectivement de 0,72 et de 0,68.

3.3. Évaluation qualitative

Les compositions colorées par codage RVB des images fusionnées multispectrale-radar, produites par les deux méthodes LTS et OLTS et notées respectivement XSR et OXSR, sont représentées sur les figures 4 et 5. Celles-ci fournissent des informations supplémentaires qui sont absentes ou non visibles distinctement sur les images XS. En effet, le capteur radar permet de fournir une information sur les fluctuations de la surface qui se traduisent sur l'image par une texture particulièrement visible sur le fleuve.

Au niveau des berges du fleuve, le radar renseigne sur la présence des bancs de sable non visibles sur les images XS. Certaines transitions sont aussi renforcées particulièrement au centre de l'image délimitant deux surfaces homogènes. Cependant, la méthode LTS conduit à des modifications significatives qui se traduisent par la disparition partielle ou totale, sur l'image XSR, de certaines structures dominantes existantes dans l'image XS. Nous constatons ainsi que certains ruisselets (nord est de l'image) sont occultés et ne peuvent être identifiés distinctement. De plus, cette méthode introduit des modifications de certaines couleurs (nord du fleuve), lesquelles révèlent que les propriétés spectrales ont été modifiées.

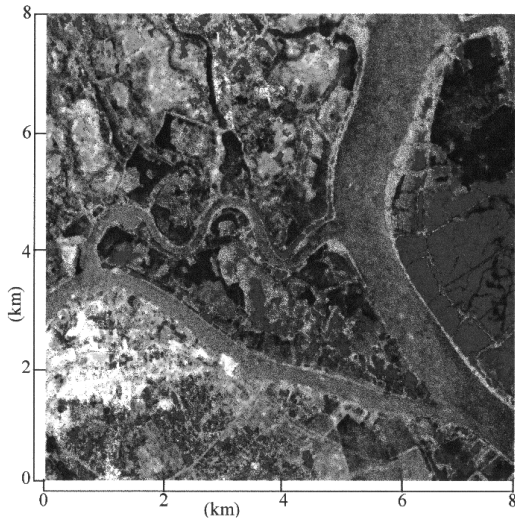


FIGURE 4 Image XSR produite par la méthode LTS. XSR image produced by the IHS method. (voir image couleur XVI à la fin de la revue)

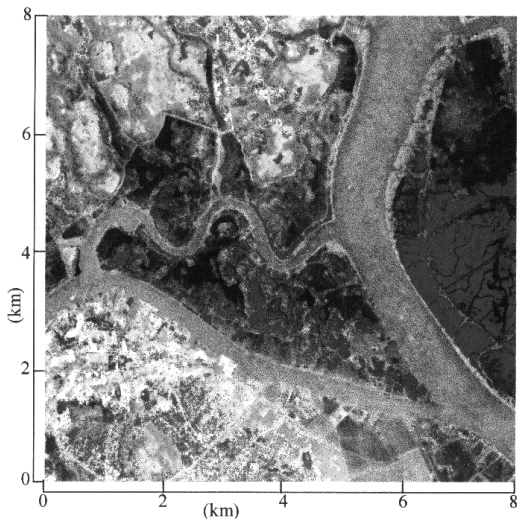


FIGURE 5 Image OXSR produite par la méthode OLTS. OXSR image produced by the WIHS method.

En revanche, l'image OXSR produite par la méthode OLTS permet de mettre en évidence l'information radar avec une meilleure préservation des structures significatives des images XS. Ceci est lié au fait que l'information radar est injectée dans les images XS seulement lorsque celle-ci est considérée comme dominante. Afin d'identifier les zones pour lesquelles l'une des deux images contient une structure dominante, nous examinons l'évolution du paramètre de fusion qui reflète le caractère dominant au travers des échelles. Pour cela, nous avons extrait des sous-images sur lesquelles nous avons calculé le paramètre de fusion pour les trois premières

échelles de décomposition. Pour mieux identifier les zones dominantes, nous représentons les valeurs du paramètre de fusion en niveaux de gris (figure 6). Les niveaux clairs indiquent que le paramètre de fusion privilégie le coefficient d'ondelette de la composante *L*, tandis que les niveaux sombres traduisent le caractère dominant de l'image *R*. Les niveaux intermédiaires indiquent que les composantes images *L* et *R* portent chacune des informations non négligeables ou d'importance équivalente au sens du critère de fusion.

Considérons à présent trois zones particulières des images XS et RSO désignées respectivement par A, B et C (figure 6). L'examen du paramètre de fusion indique que la zone A renferme des structures peu significatives sur l'image XS. En effet, nous constatons, lorsqu'on évolue au travers des échelles, que l'information apportée par XS devient de moins en moins significative alors que l'image RSO contribue de façon prépondérante dans l'image OXSR. Cela signifie que le paramètre de fusion privilégie le coefficient d'ondelette de l'image RSO. Par contre, la zone B renferme une cible ponctuelle visible sur l'image XS alors qu'elle n'existe pas dans l'image RSO. La méthode LTS fait disparaître cette cible sur l'image XSR, tandis que la méthode OLTS la préserve correctement. En effet, l'examen du paramètre de fusion, apparaissant en clair à toutes les échelles (figure 6), indique que cette cible ponctuelle est dominante. Cela signifie qu'il privilégie le coefficient d'ondelette de la composante *L*. Un cas intermédiaire se manifeste (zone C) lorsque les deux images XS et RSO apportent des informations d'importance équivalente où le paramètre de fusion apparaît avec un niveau de gris moyen. Il en résulte que les coefficients d'ondelettes respectifs sont pondérés par le paramètre de fusion pour produire le coefficient d'ondelette de l'image OXSR.

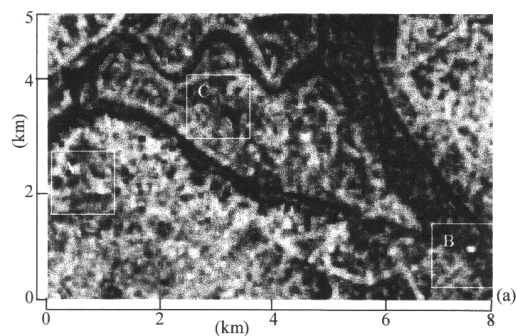


FIGURE 6a Représentation du paramètre de fusion sur trois échelles de décomposition (a) première échelle. Représentation of the fused parameter at three decomposition scales (a) first scale

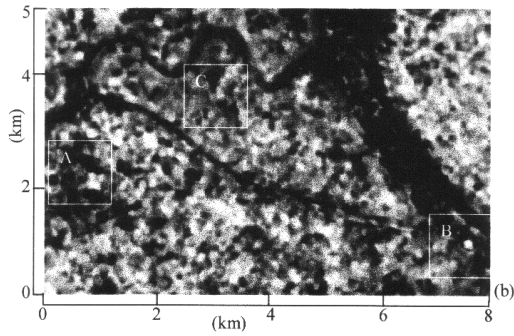


FIGURE 6b Représentation du paramètre de fusion sur trois échelles de décomposition (b) deuxième échelle. *Représentation of the fused parameter at three decomposition scales (b) second scale*

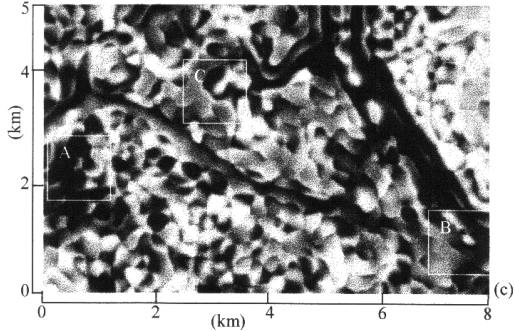


FIGURE 6c Représentation du paramètre de fusion sur trois échelles de décomposition (c) troisième échelle. *Représentation of the fused parameter at three decomposition scales (c) third scale*

3.4. Évaluation quantitative

Le but recherché dans cette évaluation est de mesurer l'importance des modifications des propriétés spectrales induites par l'utilisation des deux méthodes LTS et OLTS. Pour cela, nous utilisons deux indices (Costantini *et al.*, 1997) désignés respectivement par le coefficient de corrélation

$$\rho_m = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} (XS_m(k,l) - \overline{XS_m})(XSR_m(k,l) - \overline{XSR_m})}{\sigma_{XS_m} \sigma_{XSR_m}} \quad (7)$$

et l'écart spectral

$$\delta_m = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \frac{|XS_m(k,l) - XSR_m(k,l)|}{XS_m(k,l)} \quad (8)$$

XS_m et XSR_m désignent respectivement chacune des images XS (avec $m = 1, 2, 3$) et les néo-images multispectrale-radar XSR ou OXSR produites par les deux méthodes LTS et OLTS, tandis que

$\overline{XS_m}$, $\overline{XSR_m}$, σ_{XS_m} et σ_{XSR_m} sont les moyennes et écarts types respectifs.

Ces deux indices permettent de caractériser la ressemblance des images multispectrales et les néo-images multispectrale-radar. Lorsque les deux images se ressemblent, les deux indices tendent idéalement vers un et zéro respectivement. Nous présentons sur les figures 7 et 8 les corrélations et les écarts spectraux, exprimés en pourcentage, entre chacune des images XS et fusionnées pour les deux méthodes LTS et OLTS. L'examen du coefficient de corrélation indique que les corrélations entre les images XS et les néo-images OXSR issues de la méthode OLTS sont supérieures à 60 % avec des valeurs proches de 90 % pour les images XS2 et XS3, tandis que celles-ci sont moindres pour les néo-images issues de la méthode LTS avec une valeur proche de 30 % pour la néo-image XS 1. Par contre, l'écart spectral révèle que la méthode OLTS réduit cet écart de près de 6 % pour les images XS 1 et XS2 alors qu'il est proche de 10 % pour la méthode LTS. Cette réduction devient encore plus importante pour l'image XS3 où nous constatons que l'écart spectral est de 22 % pour la méthode OLTS contre 31 % pour la méthode LTS. Cette évaluation révèle ainsi que les propriétés spectrales des néo-images produites par la méthode OLTS sont mieux préservées comparativement à la méthode LTS.

La meilleure préservation spectrale de la méthode OLTS s'explique par le fait même de la pondération de la contribution de l'image radar dans le processus de fusion, puisqu'une partie de l'information de l'image XS est gardée lors de la fusion.

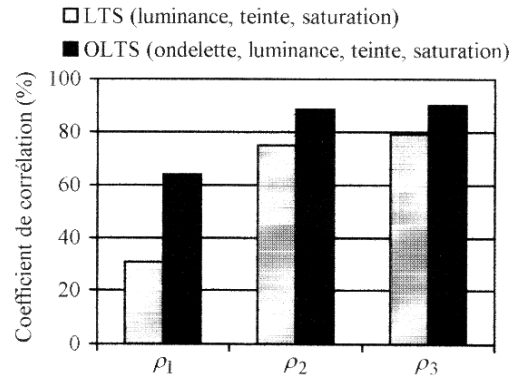


FIGURE 7 Coefficient de corrélation calculé entre chacune des images XS et les néoimages (XSR et OXSR) produites respectivement par les méthodes LTS et OLTS. *Correlation coefficient computed between each XS and new images (XSR and OXSR) produced by IHS and WIHS methods respectively*

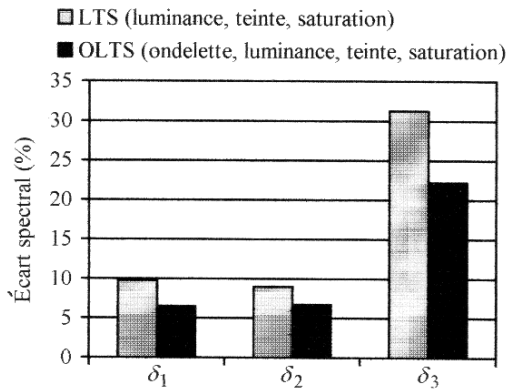


FIGURE 8 Écart spectral calculé entre chacune des images XS et les néoimages (XSR et OXSR) produites respectivement par les méthodes LTS et OLTS. Spectral Correlation coefficient computed between each XS and new images (XSR and OXSR) produced by IHS and WIHS methods respectively

4. CONCLUSION

L'espace des couleurs et la transformation en ondelettes sont deux méthodes distinctes habituellement utilisées pour fusionner des images multisources. L'originalité de cet article repose sur l'utilisation conjointe de ces deux méthodes pour fusionner des images multispectrales et radar. Pour cela, nous avons développé un modèle de fusion qui permet de retenir, de façon adaptative, dans l'image fusionnée, uniquement les détails les plus significatifs ou dominants. Ce critère est vérifié par l'examen des valeurs du paramètre de fusion à travers les échelles. Celles-ci peuvent également servir d'aide au photo-interprète dans le sens où elles permettent de mettre en évidence à chaque échelle les zones importantes (en termes d'information) sur chacune des images à fusionner. Ceci peut constituer un outil appréciable pour s'assurer une meilleure fiabilité de l'interprétation pour l'application envisagée.

Le modèle de fusion reposant sur la pondération des images sources étant admis, d'autres choix sont possibles pour le paramètre de fusion. Nous pouvons en particulier nous écarter de la condition de caractère dominant en favorisant l'une des images à fusionner. Ceci peut s'avérer utile pour une application particulière. Cependant, un tel choix implique une modification de la règle de sélection.

L'évaluation de cette méthode, sur des images HRV de SPOT et RSO de RADARSAT, révèle, d'une part, que les néo-images multispectrale-radar conservent les structures les plus dominantes issues des images multispectrales et radar et, d'autre part, les propriétés spectrales sont mieux préservées. Cet avantage peut être exploité pour des applications spécifiques comme la classification des images multispectrales et radar.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les évaluateurs anonymes pour leur importante contribution à l'amélioration de la rédaction de cet article.

Références

Bijaoui, A., Starck, J.L. et Murtagh, F. (1994) Restauration des images multi-échelles par l'algorithme à trous. *Traitement du signal*, vol. 11, no 3, p. 229-243.

Cliche, G., Bonn, F. and Teillet, P. (1985) Integration of SPOT panchromatic data channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 5 1, no 3, p. 311-316.

Costantini, M., Farina, A. and Zirilli, F. (1997) The fusion of different resolution SAR images. *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no 1, p. 139-146.

Djamdi, J.P., Bijaoui, A. and Maniere, R. (1993) Geometrical registration of images The multiresolution approach. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, no 5, p. 645-653.

De Sève, D., Toutin, Th. et Desjardins, R. (1996) Évaluation de deux méthodes de correction géométrique d'images Landsat TM et ERS-1 RAS dans une étude de linéaments géologiques. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, no 1, p. 131-142.

Elachi, C. (1988) Spaceborne radar remote sensing: Applications and techniques. IEEE Press, New York, 255 p.

Haack, B.N. and Slonecker, E.T. (1994) Merged spaceborne radar and thematic mapper digital data for locating villages in Sudan. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 60, no 10, p. 1253-1257.

Harris, J.R. and Murray, R. (1990) IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, no 12, p. 1631-1641.

Holdschneider, M., Kronland-Martinet, R., Morlet, J. and Tchamitchian, Ph. (1989) A real time algorithm for the signal analysis with the help of the wavelet transform. In J.M. Combes, A. Grossman and Ph. Tchamitchian (ed.) Wavelet. Springer-Verlag, Berlin, p. 286-297.

Mallat, S.G. (1989) A multiresolution signal decomposition: The wavelet transform. *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no 7, p. 674-693.

Mangolini, M. (1994) Apport de la fusion d'images satellitaires multicapteurs au niveau pixel en télédétection et photo-interprétation. Thèse de doctorat, université de Nice, 174 p.

Mangolini, M., Ranchin, T. et Wald, L. (1993) Fusion d'images SPOT multispectrale (XS) et panchromatique (P), et d'images radar. In De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS. Cépaduès-Éditions, Toulouse, 574 p.

Pohl, C. and van Genderen, J.L. (1998) Multisensor fusion in remote sensing: Concepts methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no 5, p. 823-854.

Rast, M., Jaskolla, F. and Arnason, K. (1991) Comparative digital analysis of SeasatSAR data and Landsat-TM data for Iceland. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, no 3, p. 527-544.

Rees, W.G. and Satchell, M.J.F. (1997) The effect of median filtering on synthetic aperture radar images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no 13, p. 2887-2893.

Sabins, F.F. (1987) Remote sensing: Principles and interpretation. 2^{ème} édition, W. H. Freeman, New York, p. 235-277.

Shensa, M.J. (1992) Discrete Wavelet Transform: Wedding the à trous and Mallat Algorithms. *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 40, no 10, p. 2464-2482

Shih, T.Y. (1995) The reversibility of six geometric colour spaces. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 6 1, no 10, p. 1223-1232.

Welch, R. and Ehlers, M. (1988) Cartographic feature extraction with integrated SIR-B and Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, no 5, p. 873-889.

Yésou, H., Besnus, Y., Rolet, J., Pion, J.C. and Aing, A. (1993) Merging Seasat and SPOT imagery for the study of geological structures in a temperate agricultural region. *Remote Sensing of Environment*, no 43, p. 265-279.